

PCT/JP03/14125

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

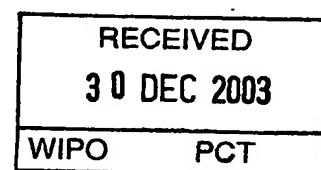
05.11.03

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 3 年 1 0 月 1 0 日  
Date of Application:

出 願 番 号            特 願 2 0 0 3 - 3 5 2 7 3 6  
Application Number:  
[ST. 10/C]:            [ J P 2 0 0 3 - 3 5 2 7 3 6 ]



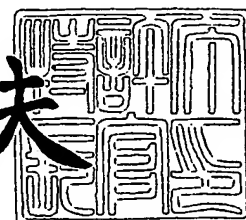
出 願 人            松下電器産業株式会社  
Applicant(s):

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 3 年 1 2 月 1 2 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号    出証特 2 0 0 3 - 3 1 0 3 3 0 4

【書類名】 特許願  
【整理番号】 2032450303  
【提出日】 平成15年10月10日  
【あて先】 特許庁長官 殿  
【国際特許分類】 G02B 26/06  
【発明者】  
    【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内  
    【氏名】 虫鹿 由浩  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000005821  
    【氏名又は名称】 松下電器産業株式会社  
【代理人】  
    【識別番号】 100101683  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 奥田 誠司  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2002-322247  
    【出願日】 平成14年11月 6日  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 082969  
    【納付金額】 21,000円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1  
    【包括委任状番号】 0011136

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

基板と、

前記基板上に変位可能に支持された可動素子と、

前記可動素子を変位させるための駆動信号を出力する駆動部と、

前記可動素子の変位と前記駆動信号との対応関係を保持する変換部と、

前記駆動信号を与えられた状態での前記可動素子の変位を検出する変位検出部と、

前記駆動信号と前記変位検出部の出力とを用いて前記変換部が保持する対応関係を較正する較正部と

を備えたマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2】**

前記可動素子は、前記基板に固定された固定電極と、前記固定電極に対向する可動電極とを備えた静電型の可動素子であって、

前記変位検出部は、前記固定電極と前記可動電極との間の静電容量の変化によって前記可動素子の変位を検出する請求項 1 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 3】**

前記駆動部は、前記可動素子の 1 次共振周波数近傍またはそれ以下の低周波信号を前記駆動信号として出力し、

前記変位検出部は、前記可動素子の 1 次共振周波数以上の高周波信号を前記駆動信号に重畳させる請求項 1 または 2 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 4】**

前記駆動部は、実質的な DC 電圧を前記駆動信号として出力する請求項 3 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 5】**

前記駆動部は、複数段階の前記 DC 電圧を前記駆動信号として出力し、

前記変位検出部は、前記複数段階の各段階において前記可動素子の変位を検出し、

前記較正部は、前記各段階の DC 電圧と前記変位検出部の出力とを所定の形式の近似関数で近似する請求項 4 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 6】**

前記駆動部は、複数段階の周波数を持つ低周波信号を前記駆動信号として出力し、

前記変位検出部は加振された前記可動素子の変位を検出し、

前記較正部は、前記駆動信号と変位検出部の出力とを対応付けて、前記可動素子の振幅応答または位相応答を算出する請求項 3 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 7】**

前記駆動部は、前記可動素子の 1 次共振周波数近傍の低周波信号を前記駆動信号として複数段階出力し、

前記変位検出部は前記複数段階の各段階において加振された前記可動素子の変位を検出し、

前記較正部は、前記駆動信号と変位検出部の出力とを対応付けて、前記可動素子の 1 次共振周波数を抽出する請求項 3 または 6 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 8】**

前記駆動信号の振幅を大きく設定した場合には、前記変位検出部が発生する前記高周波信号の振幅を小さく設定する請求項 3 から 7 のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 9】**

前記可動素子の前記可動電極は、所定の軸に関して概対称な第 1 導電性部分および第 2 導電性部分を含み、前記軸を中心として傾動自在に支持されると共に、

前記固定電極は、前記可動電極の第 1 導電性部分に間隙を介して対向する第 1 電極と、前記可動電極の第 2 導電性部分に間隙を介して対向する第 2 電極とを含み、

前記駆動部は、前記第 1 導電性部分と前記第 1 電極との間または前記第 2 導電性部分と

前記第2電極との間に前記駆動信号を与え、

前記変位検出部は、前記第1電極に第1の高周波信号を印加し、前記第2電極に前記第1の高周波信号と同振幅かつ逆位相の第2の高周波信号を印加し、前記第1導電性部分と前記第2導電性部分とに電氣的に接続した端子の電圧を検出する請求項2から8のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項10】

電源起動時に前記較正部を動作させる請求項1から9のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項11】

温度検出部を備え、前記温度検出部が所定値以上の温度変化を検出した場合に前記較正部を動作させる請求項1から10のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項12】

前記変位検出部の出力が所定の範囲を超えている場合に、前記可動素子または前記変位検出部の異常を判別する異常判別部を備えた請求項1から11のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項13】

前記異常判別部が異常を判別した場合に、前記較正部による前記対応関係の更新を禁止する請求項12に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項14】

基板と、  
前記基板上に変位可能に支持された複数の可動素子と、  
前記可動素子を変位させるための駆動信号を出力する駆動部と、  
前記可動素子の変位を検出する変位検出部と、  
前記駆動部および／または前記変位検出部と前記複数の可動素子の各々とを選択的に接続する切り替え部と、  
を備えたマイクロアクチュエータ。

【請求項15】

前記切り替え部が前記変位検出部の変位検出対象を時系列で切り替えながら各前記可動素子の変位を検出する請求項14に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項16】

前記変位検出部の出力を用いて前記駆動部の出力を閉ループ制御する閉ループ制御部を備えた請求項14または15に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項17】

前記駆動部の出力を開ループ制御する開ループ制御部をさらに備え、前記閉ループ制御部と前記開ループ制御部とを時系列で切り替えて前記可動素子の制御を行う請求項16に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項18】

前記開ループ制御部が、前記閉ループ制御部により制御された前記駆動部の出力をホールドするホールド部を備える請求項17に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項19】

前記可動素子が前記駆動信号に応じた電荷を蓄積可能に設けられ、  
前記切り替え部が、前記可動素子を前記閉ループ制御部に接続した第1の状態と、前記可動素子を高インピーダンスとして前記電荷を保持した第2の状態とに切り替える請求項16に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項20】

各前記可動素子が前記閉ループ制御部と接続されている時間に関わる値を計測するカウンタと、前記閉ループ制御の収束を検知する収束検知部とを備え、

前記カウンタからの出力が所定の上限値を超えても前記収束検知部が前記収束を検知しない場合に、前記切り替え部が前記可動素子と前記閉ループ制御部との接続を切断する請求項16から19のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2 1】**

前記可動素子が前記閉ループ制御部と接続されている時間に関わる値が、前記閉ループ制御部の繰り返しループ回数である請求項 2 0 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2 2】**

前記収束検知部が前記収束を検知して、前記切り替え部が前記閉ループ制御部の接続先を次の可動素子に切り替えた時点における前記カウンタの出力が前記上限値未満であった場合に、前記カウンタの出力に従って、次の可動素子の上限値を変更する請求項 2 0 に記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2 3】**

前記切り替え部が、前記複数の可動素子のうち少なくとも 2 つ以上を同時に前記変位検出部に接続する請求項 1 4 から 2 2 のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2 4】**

前記高周波信号の振幅値と同等以上の大きさのバイアス電圧を、前記固定電極と前記可動電極の双方に与えた請求項 3 から 1 3 のいずれかに記載のマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2 5】**

基板と、

前記基板上に変位可能に支持された可動素子と、

前記可動素子を変位させるための駆動信号を出力する駆動部と、

前記可動素子の変位を検出する変位検出部と、

前記駆動部および／または前記変位検出部と前記可動素子とを結ぶ配線経路中に設けられ、前記配線経路を接続した状態と切断した状態との間で切り替えを行う切り替え部と、

前記配線経路を接続した状態で得られた前記変位検出部の第 1 の出力を、前記配線経路を切断した状態で得られた前記変位検出部の第 2 の出力を用いて補正する較正部と、  
を備えたマイクロアクチュエータ。

**【請求項 2 6】**

前記可動素子の少なくとも一部に光反射領域を備えた請求項 1 から 2 5 のいずれかに記載の変形ミラー。

## 【書類名】 明細書

【発明の名称】 変位検出機能を備えたマイクロアクチュエータ、および当該マイクロアクチュエータを備えた可変形ミラー

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、変位検出機能を備えたマイクロアクチュエータ、および当該マイクロアクチュエータを備えた可変形ミラー (deformable mirror) に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

半導体プロセスを用いたMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術により、様々なマイクロアクチュエータが開発されている。MEMS技術によれば多数のアクチュエータや駆動回路等を同時に一括形成できるため、その特徴を活かした応用が図られており、微小なミラーを多数形成した可変形ミラーもその1つである。可変形ミラーは、光の波面収差をアクティブに補正する補償光学装置や、ディスプレイや光通信などの各種装置に応用されている。

## 【0003】

可変形ミラーの変位量の制御に関しては従来、下記の2つの方法が知られている。

## 【0004】

1つは開ループ制御であり、多段階の駆動電圧を与えてミラー変位量を制御するものがある (例えば非特許文献1参照)。同文献では、可変形ミラーはミラー変位量によって回折光量を制御する回折格子として利用され、可変形ミラーの変位量を多段階に開ループ制御している。同文献には、予め製造工程において駆動電圧と回折光量との関係を実験的に数点測定し、これを補間して変換テーブルを作成し、可変形ミラー毎の特性のばらつきを補正する技術が開示されている。

## 【0005】

もう1つは外部センサを用いた閉ループ制御であり、例えば補償光学装置においては波面センサを用いて検出した誤差信号から可変形ミラーの制御信号を作成して閉ループ制御を行っている (例えば非特許文献2参照)。

## 【0006】

また、マイクロセンサの分野では下記の技術が知られている。圧力センサにおいては、外部圧力による隔膜 (diaphragm) の変形を静電容量変化で検出するものがある (例えば非特許文献3参照)。同文献には、複数の温度条件下において圧力とセンサ出力との関係を予め実験的に求めておき、これらの関係を近似した較正多項式をメモリに格納した構成が開示されている。

## 【0007】

また、外部圧力を打ち消すように別の電極で静電力を発生して隔膜の変形を実質的に零になるように制御を行い、その静電力の大きさから外部圧力を求める平衡力 (Force Balanced) 型の圧力センサもある (例えば非特許文献4参照)。

## 【0008】

角速度センサにおいては、外部からの角速度によって発生するコリオリ力で可動子が変位する量を静電容量変化で検出するものがある (例えば非特許文献5参照)。同文献には可動子の初期の位置ずれによる零点のドリフトを補正する構成が開示されている。

【非特許文献1】 R.W. Corrigan, D.T.Amm and C.S. Gudeman " Grating Light Valve eTM Technology for Projection Displays", Presented at the International Display Workshop, Kobe Japan, 9 Dec 1998, Paper Number LAD5-1

【非特許文献2】 J.A. Perreault, T.G. Bifano et al., " Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors ", Optical Engineering, Vol. 41, No.3, pp.561-566 (March 2002)

【非特許文献3】 S.B.Crary, W.G.Baer et al., " Digital Compensation of High-performance Silicon Pressure Transducers ", Sensors and Actuators, A21-A23, pp

.70-72 (1990)

【非特許文献4】B.P. Gogoi, C.C. Wang, C.H. Mastrangelo, "Force Balanced Micromachined Pressure Sensors", IEEE transactions on electron devices, Vol. 48, No.8, pp.1575-1584 (August 2001)

【非特許文献5】T. Juneau, A.P. Pisano, J.H. Smith, "Dual Axis Operation of a Micromachined Rate Gyroscope", Transducers'97, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, pp.883-886

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、上記のようなマイクロアクチュエータには、以下の課題があった。

【0010】

製造工程で変換テーブルを作成して閉ループ制御を行うものは、変換テーブルのデータ採取が煩雑で、かつ経時変化あるいは環境変化等に対する対応に限界があった。例えば駆動電圧と回折光量との関係を採用するためには、実際に外部から光を当てて1画素毎に光量を測定する必要があり、専用の測定装置を必要とすると共に、光スポットの位置合わせ等の作業が多く、データ採取が極めて煩雑であった。また、測定できるのは製造工程での初期特性のみであり、実際に装置に組み込まれた状態で可動部の変位量をモニターすることはできなかった。このため、経時変化や温度などの環境変化に伴うアクチュエータ特性の変化があっても、これに対応した補正ができなかった。

【0011】

波面センサ等の外部センサを用いて閉ループ制御を行うものは、まず第1の課題として、制御構成が高価であった。安定な閉ループ制御を行うためには、波面センサの検出点数は可変形ミラーのアクチュエータ数よりも多くする必要があり、例えばShack-Hartmann型波面センサでは一般的に検出点数はアクチュエータ数の約2倍以上が必要とされている。このため、閉ループ制御のためには比較的高分解能のセンサが必要で、また、波面センサの各検出点と可変ミラーの各駆動点とを精密に対応させる位置調整も必要であった。さらに、複数の検出信号から波面再構成などの演算を行って各駆動点の制御信号を生成する制御回路も比較的高精度で大規模なものを必要とした。また、第2の課題としては、波面センサによる光量損失が大きい点にあった。波面センサは波面の補正対象である光束の一部を使って波面を検出しているので、これは光量の損失要因である。閉ループ制御のために波面の検出点数を増やし、各検出点において一定のセンサ感度(S/N)を確保しようとすると、波面センサによる大きな光量損失が発生していた。

【0012】

また、圧力センサや角速度センサ等のマイクロセンサには、下記のような構成上の特徴とそれに伴う課題があった。まず第1に、非特許文献3～5に記載されたマイクロセンサは1つの可動子に対して変位検出と制御を行っているだけであるが、可変形ミラーのように多数のアクチュエータを同時に駆動することが必要な場合には、各アクチュエータに対して閉ループ制御を行うと、このための回路規模が極めて大きくなるという課題があった。すなわち、変位検出のための検出信号発生器、増幅器、A/D変換器、制御回路などの各回路がアクチュエータ数と同数必要であり、特にアクチュエータ数が多数の場合には回路規模が大きくなってチップ全体のコストが高くなるという課題があった。

【0013】

第2の課題としては、駆動信号と変位との関係を測定して自己較正する構成が開示されておらず、従来技術をアクチュエータの変位精度を向上させる用途に用いることが困難であった。圧力センサも角速度センサも外界から与えられた力により変位する可動子とこの可動子の変位をセンサ出力に変換する構成は備えているが、この変換時の対応付けは予めメモリに格納されたものを用いており、零点のドリフト補正を除けば、可動子の変位と出力との対応関係は固定されていた。零点のドリフト補正は可動子の変位していない状態でのオフセットを補正するもので、これは駆動信号と変位との関係とは本質的に無関係であ

る。従って、例えば繰り返し疲労によるバネ定数変化等といった機械特性の経時変化があっても、これを補正することはできなかった。

【0014】

すなわち、アクチュエータに変位を与えながらその駆動信号と変位との関係を自己較正する構成はいずれの文献にも開示されておらず、経時変化や様々な環境変化に対して変化するアクチュエータ特性を広い変位範囲で補償することは困難であった。

【0015】

本発明は上記課題を解決し、簡易な構成で、経時変化あるいは環境変化に対する特性ばらつきを補正して信頼性の高い位置制御を行うマイクロアクチュエータおよび可変形ミラーを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0016】

本発明のマイクロアクチュエータは、基板と、前記基板上に変位可能に支持された可動素子と、前記可動素子を変位させるための駆動信号を出力する駆動部と、前記可動素子の変位と前記駆動信号との対応関係を保持する変換部と、前記駆動信号を与えられた状態での前記可動素子の変位を検出する変位検出部と、前記駆動信号と前記変位検出部の出力とを用いて前記変換部が保持する対応関係を較正する較正部とを備える。

【0017】

ある好ましい実施形態において、前記可動素子は、前記基板に固定された固定電極と、前記固定電極に対向する可動電極とを備え、前記変位検出部は、前記固定電極と前記可動電極との間の静電容量の変化によって前記可動素子の変位を検出する。

【0018】

ある好ましい実施形態において、前記駆動部は、前記可動素子の1次共振周波数近傍またはそれ以下の低周波信号を前記駆動信号として出力し、前記変位検出部は、前記可動素子の1次共振周波数以上の高周波信号を前記駆動信号に重畳させる。

【0019】

ある好ましい実施形態において、前記駆動部は、実質的なDC電圧を前記駆動信号として出力する。

【0020】

ある好ましい実施形態において、前記駆動部は、複数段階の前記DC電圧を前記駆動信号として出力し、前記変位検出部は前記複数段階の各段階において前記可動素子の変位を検出し、前記較正部は前記各段階のDC電圧と前記変位検出部の出力とを所定の形式の近似関数で近似する。

【0021】

ある好ましい実施形態において、前記駆動部は、複数段階の周波数を持つ低周波信号を前記駆動信号として出力し、前記変位検出部は加振された前記可動素子の変位を検出し、前記較正部は、前記駆動信号と変位検出部の出力とを対応付けて、前記可動素子の振幅応答または位相応答を算出する。

【0022】

ある好ましい実施形態において、前記駆動部は、前記可動素子の1次共振周波数近傍の低周波信号を前記駆動信号として複数段階出力し、前記変位検出部は前記複数段階の各段階において加振された前記可動素子の変位を検出し、前記較正部は、前記駆動信号と変位検出部の出力とを対応付けて、前記可動素子の1次共振周波数を抽出する。

【0023】

ある好ましい実施形態において、前記駆動信号の振幅を大きく設定した場合には、前記変位検出部が発生する前記高周波信号の振幅を小さく設定する。

【0024】

ある好ましい実施形態において、前記可動素子の前記可動電極は、所定の軸に関して概対称な第1導電性部分および第2導電性部分を含み、前記軸を中心として傾動自在に支持されると共に、前記固定電極は、前記可動電極の第1導電性部分に間隙を介して対向する



第1電極と、前記可動電極の第2導電性部分に間隙を介して対向する第2電極とを含み、前記駆動部は、前記第1導電性部分と前記第1電極との間または前記第2導電性部分と前記第2電極との間に前記駆動信号を与え、前記変位検出部は、前記第1電極に第1の高周波信号を印加し、前記第2電極に前記第1の高周波信号と同振幅かつ逆位相の第2の高周波信号を印加し、前記第1導電性部分と前記第2導電性部分とに電氣的に接続した端子の電圧を検出する。

【0025】

ある好ましい実施形態において、電源起動時に前記較正部を動作させる。

【0026】

ある好ましい実施形態において、温度検出部を備え、前記温度検出部が所定値以上の温度変化を検出した場合に前記較正部を動作させる。

【0027】

ある好ましい実施形態において、前記変位検出部の出力が所定の範囲を超えている場合に、前記可動素子または前記変位検出部の異常を判別する異常判別部を備える。

【0028】

ある好ましい実施形態において、前記異常判別部が異常を判別した場合に、前記較正部による前記対応関係の更新を禁止する。

【0029】

また、本発明のマイクロアクチュエータは、基板と、前記基板上に変位可能に支持された複数の可動素子と、前記可動素子を変位させるための駆動信号を出力する駆動部と、前記可動素子の変位を検出する変位検出部と、前記駆動部および／または前記変位検出部と前記複数の可動素子の各々とを選択的に接続する切り替え部とを備える。

【0030】

ある好ましい実施形態において、前記切り替え部が前記変位検出部の変位検出対象を時系列で切り替えながら各前記可動素子の変位を検出する。

【0031】

ある好ましい実施形態において、前記変位検出部の出力を用いて前記駆動部の出力を閉ループ制御する閉ループ制御部を備える。

【0032】

ある好ましい実施形態において、前記駆動部の出力を開ループ制御する開ループ制御部をさらに備え、前記閉ループ制御部と前記開ループ制御部とを時系列で切り替えて前記可動素子の制御を行う。

【0033】

ある好ましい実施形態において、前記開ループ制御部が、前記閉ループ制御部により制御された前記駆動部の出力をホールドするホールド部を備える。

【0034】

ある好ましい実施形態において、前記可動素子が前記駆動信号に応じた電荷を蓄積可能に設けられ、前記切り替え部が、前記可動素子を前記閉ループ制御部に接続した第1の状態と、前記可動素子を高インピーダンスとして前記電荷を保持した第2の状態とに切り替える。

【0035】

ある好ましい実施形態において、各前記可動素子が前記閉ループ制御部と接続されている時間に関わる値を計測するカウンタと、前記閉ループ制御の収束を検知する収束検知部とを備え、前記カウンタからの出力が所定の上限値を超えても前記収束検知部が前記収束を検知しない場合に、前記切り替え部が前記可動素子と前記閉ループ制御部との接続を切断する。

【0036】

ある好ましい実施形態において、前記可動素子が前記閉ループ制御部と接続されている時間に関わる値が、前記閉ループ制御部の繰り返しループ回数である。

【0037】

ある好ましい実施形態において、前記収束検知部が前記収束を検知して、前記切り替え部が前記閉ループ制御部の接続先を次の可動素子に切り替えた時点における前記カウンタの出力が前記上限値未満であった場合に、前記カウンタの出力に従って、次の可動素子の上限値を変更する。

【0038】

ある好ましい実施形態において、前記切り替え部が、前記複数の可動素子のうち少なくとも2つ以上を同時に前記変位検出部に接続する。

【0039】

ある好ましい実施形態において、前記高周波信号の振幅値と同等以上の大きさのバイアス電圧を、前記固定電極と前記可動電極の双方に与える。

【0040】

また、本発明のマイクロアクチュエータは、基板と、前記基板上に変位可能に支持された可動素子と、前記可動素子を変位させるための駆動信号を出力する駆動部と、前記可動素子の変位を検出する変位検出部と、前記駆動部および／または前記変位検出部と前記可動素子とを結ぶ配線経路中に設けられ、前記配線経路を接続した状態と切断した状態との間で切り替えを行う切り替え部と、前記配線経路を接続した状態で得られた前記変位検出部の第1の出力を、前記配線経路を切断した状態で得られた前記変位検出部の第2の出力を用いて補正する較正部とを備える。

【0041】

本発明の可変形ミラーは、前記マイクロアクチュエータの前記可動素子の少なくとも一部に光反射領域を備える。

【発明の効果】

【0042】

本発明によれば、駆動部が出力する駆動信号によって可動素子を変位させながら、変位検出部によってその変位を検出し、較正部が変位と駆動信号との対応関係を較正しているために、外部の変位測定器が不要であり、極めて簡易に個別の可動素子の変位を検出することができるとともに、経時変化や温度などの環境変化に伴う可動素子特性の変化に対応することができる。

【0043】

また、切り替え部が、駆動部および／または変位検出部を複数の可動素子の各々と選択的に接続するために、複数の可動素子を備えたマイクロアクチュエータであっても、変位検出のための回路を削減してチップコストを低減することができる。

【0044】

また、こうした自己変位検出機能をもつマイクロアクチュエータを可変形ミラーに用いることにより、簡易な構成で、経時・環境変化に対する信頼性が高く、光量損失の小さい光制御を行うことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0045】

以下、図面を参照しながら本発明の実施の形態を説明する。

【0046】

(実施形態1)

まず、図1～3を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの第1の実施形態を説明する。本実施形態のマイクロアクチュエータは傾動動作を行う静電アクチュエータであり、例えば半導体製造プロセス技術を用いて作成され得て、ここでは光の反射方向を多段階に制御する可変形ミラーに適用されている。

【0047】

まず、図1を参照する。図1は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの概略構成図である。図1において、シリコンウェハである基板1上には駆動回路2が設けられ、その上に30 $\mu$ m以上の厚さで絶縁層3が設けられている。絶縁層3上にはn個（nは2以上の整数）の可動素子A1～Anからなる可動部4が構成されている。可動部4の可動素子A

1~Anは互いに同一の構成を有しており、ここではi (iは1以上n以下の整数) 番目の可動素子Aiを例にとって説明する。可動素子Aiは2つの固定電極ELiとERiと、これらの固定電極に対向する位置に設けられた可動電極Yiと、この可動電極Yiを傾動自在に支持する一对の導電性のポストPiとからなる。可動素子AiはポストPiを中心にして左右対称の形状をしており、可動電極Yiはその第1導電性部分YLiが第1電極ELiと間隙を介して対向し、第2導電性部分YRiが第2電極ERiと間隙を介して対向している。可動電極Yiの上面は光を反射する反射ミラーとなっている。第1電極ELiまたは第2電極ERiと可動電極Yiとの間で電位差を与えると、この静電力によって可動電極Yiは左または右回りの傾動を行い、反射光の向きを変える。第1電極ELiと可動電極Yiの第1導電性部分YLiとが形成するコンデンサの容量をCLi、第2電極ERiと可動電極Yiの第2導電性部分YRiとが形成するコンデンサの容量をCRiとすると、可動電極Yiが水平姿勢にある初期状態ではほぼCLi=CRiであり、可動電極Yiの傾動変位に応じて容量CLi、CRiがそれぞれ逆方向に増減するため、可動電極Yiの変位検出はこのCLi、CRiの静電容量変化を利用する。端子TLi、TRi、TPiはそれぞれ固定電極ELi、ERi、ポストPiに接続しており、絶縁層3を貫通したビアとして駆動回路2と接続される。

#### 【0048】

次に図2を参照して、駆動回路2の詳細を説明する。図2は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの駆動回路の概略構成図である。駆動回路2は全体を制御する制御部5、各可動素子Aiの変位を検出する変位検出部6、変位検出部6の測定対象となる可動素子を選択する切り替え部7を備えている。

#### 【0049】

制御部5はI/F部10、目標変位設定部11、変換部12、電圧指令部13、変位検出制御部14、較正部15、第1の駆動電圧発生部20、第2の駆動電圧発生部22とを備えている。本実施形態では電圧指令部13、第1の駆動電圧発生部20、第2の駆動電圧発生部22が駆動部を構成している。

#### 【0050】

I/F部10は、制御に関わる外部とのコマンドおよびデータをやりとりする。

#### 【0051】

目標変位設定部11は、I/F部10からの出力に基づき、可動素子A1~Anの各目標変位を決定する。

#### 【0052】

変換部12は、可動素子A1~Anの各目標変位を、駆動電圧に関わる目標データに変換する。変換部12には、各可動素子A1~Anの駆動電圧と変位との対応関係が変換テーブルとして格納され、各可動素子A1~Anの特性ばらつきはここで補正される。

#### 【0053】

電圧指令部13は、各可動素子A1~Anの制御を行う際には、変換部12の出力に基づき可動素子A1~Anを変位させるための電圧指令値D(VL1)~D(VLn)、D(VR1)~D(VRn)を出力する。電圧指令値D(VL1)~D(VLn)、D(VR1)~D(VRn)は、固定電極用端子TL1~TLn、TR1~TRnに与える駆動電圧VL1~VLn、VR1~VRnにそれぞれ対応している。また電圧指令部13は、可動素子Aiの変位を検出する際には、固定電極用端子TLi、TRiに与える駆動電圧のDC成分VL、VRの差動分VL-VRの値をある所定のタイミングで変化させるように電圧指令値D(VL)、D(VR)を変化させていく。このやり方の1例として、ここではVLまたはVRの一方を0Vに設定しておき、他方を0Vから所定電圧単位で増やしていく方法をとる。電圧指令部13が発生するVL、VRの制御値およびその変化のタイミングに関しては変位検出制御部14の出力に基づいて制御が行われる。

#### 【0054】

変位検出制御部14は、電圧指令部13に電圧指令値D(VL)、D(VR)を変化させるための指令を行うと同時に変位検出部6のトランジスタ26を導通させ、これを所定時間保持して、検出信号Voutのオフセットを除去する。これにより、電圧指令値D(VL)、D(VR)を変化させることにより発生する検出信号Voutの変動をキャンセルすることができる。

## 【0055】

較正部15は、電圧指令部13が出力する電圧指令値 $D(V_L)$ 、 $D(V_R)$ と、変位検出部6が出力する可動素子 $A_i$ の変位の検出結果とを入力し、電圧指令値 $D(V_L)$ 、 $D(V_R)$ と変位との対応関係を作成する。これらの関係は所定の形式の近似曲線にフィットさせることで測定誤差を除去し、補間された形で変換部12の変換テーブルに格納される。

## 【0056】

第1の駆動電圧発生部20は、電圧指令部13からの電圧指令値 $D(V_L)$ に基づき、DC電圧 $V_L$ を発生する。第2の駆動電圧発生部22は、電圧指令部13からの電圧指令値 $D(V_R)$ に基づき、DC電圧 $V_R$ を発生する。

## 【0057】

変位検出部6は、第1の高周波信号発生部21、第2の高周波信号発生部23、オペアンプ24、コンデンサ25、トランジスタ26、増幅器27、AD変換器28とを備える。

## 【0058】

第1の高周波信号発生部21は振幅 $V_A$ 、周波数 $f$ のAC電圧を発生する。周波数 $f$ は10kHz～1MHzの範囲内の所定の値をとり、これは可動素子 $A_i$ の1次共振周波数 $f_0$  (1～10kHz) よりも大きな値とする。第1の駆動電圧発生部20と第1の高周波信号発生部21とは直列に接続されており、両者の和として第1の出力電圧 $V_L + V_A \sin(2\pi ft)$  が得られる。

## 【0059】

第2の高周波信号発生部23は第1の高周波信号発生部21と同じ振幅 $V_A$ 、周波数 $f$ で位相が $180^\circ$ 異なるAC電圧を発生する。第2の駆動電圧発生部22と第2の高周波信号発生部23とは直列に接続されており、両者の和として第2の出力電圧 $V_R - V_A \sin(2\pi ft)$  が得られる。

## 【0060】

切り替え部7によって可動素子 $A_i$ との接続が選択された場合には、第1および第2の出力電圧 $V_L + V_A \sin(2\pi ft)$ 、 $V_R - V_A \sin(2\pi ft)$  はそれぞれ端子 $T_{Li}$ 、 $T_{Ri}$ に入力され、端子 $T_{Pi}$ からの出力がオペアンプ24に入力される。オペアンプ24と容量 $C_f$ のコンデンサ25とで形成された回路の出力 $V_{out}$ は(数1)で表され、右辺の第2項は駆動電圧 $V_L$ 、 $V_R$ の変化 $\Delta V_L$ 、 $\Delta V_R$ によるオフセットであるため、既述したように検出に先立ってMOSトランジスタ26を導通させてこれを除去すれば、静電容量の変化 $C_{Ri} - C_{Li}$ を検出するための信号が精度良く得られる。

## 【0061】

(数1)

$$V_{out} = ((C_{Ri} - C_{Li}) / C_f) \cdot V_A \sin(2\pi ft) + (C_{Ri} \Delta V_R - C_{Li} \Delta V_L) / C_f$$

## 【0062】

出力 $V_{out}$ は増幅器27で増幅され、AD変換器28でデジタルデータ化されて、較正部15に出力される。

## 【0063】

切り替え部7は、可動素子 $A_1 \sim A_n$ のそれぞれについて、駆動制御を行う駆動モードと変位検出を行う検出モードとの間で切り替えを行う。図では可動素子 $A_i$ は検出モードに設定されており、既に説明したように変位検出部6と接続されて応答特性が調べられる。また、図では可動素子 $A_{i+1}$ は駆動モードに設定されており、固定電極用端子 $T_{Li+1}$ 、 $T_{Ri+1}$ はそれぞれ電圧指令部13により指令された電圧 $V_{Li+1}$ 、 $V_{Ri+1}$ が印加され、また可動電極用端子 $T_{Pi+1}$ は接地電位に接続されて、目標位置に駆動される。

## 【0064】

以上のように構成したマイクロアクチュエータの動作について、図3を参照しながら説明する。図3は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの較正動作ルーチンのフローチャートである。

## 【0065】

装置起動時や、あるいは図示しない温度センサが所定値以上の温度変化を検知したとき、または内蔵するタイマが前回の変換データ更新時から所定時間以上の動作時間をカウントしたとき等に、本実施形態のマイクロアクチュエータは変換部12に格納された可動素子A1~Anの変換テーブルを更新する。

#### 【0066】

まず、 $i=1$ とし(手順30)、変位検出を行う可動素子Aiとして1番目の可動素子A1が選択される。切り替え部7が可動素子Aiを変位検出部6に接続する(手順31)。このとき、Ai以外の全ての可動素子は変位検出部6との接続を切り離されている。

#### 【0067】

変位検出においては、電圧指令部13が出力する電圧指令値D(V<sub>L</sub>)、D(V<sub>R</sub>)を変化させ、第1の駆動電圧発生部20の出力電圧V<sub>L</sub>と第2の駆動電圧発生部20の出力電圧V<sub>R</sub>とを複数段階で出力させながら、各段階で可動素子Aiの変位検出を行う。具体的には、まずV<sub>R</sub>を0Vに設定して(手順32)、V<sub>L</sub>を0Vから最大電圧V<sub>max</sub>まで段階的に増加させ、各電圧における可動素子Aiの変位を測定する。

#### 【0068】

測定された変位データは各V<sub>L</sub>の値と共に較正部15に記憶される(手順33)。次に、V<sub>L</sub>を0Vとして(手順34)、V<sub>R</sub>を0Vから最大電圧V<sub>max</sub>まで段階的に増加させ、各電圧における可動素子Aiの変位を測定する。測定された変位データは各V<sub>R</sub>の値と共に較正部15に記憶される(手順35)。測定が完了すると、較正部15は電圧差V<sub>L</sub>-V<sub>R</sub>と変位データとを所定の近似関数にフィッティングし、近似関数の各項の係数および相関値を算出する(手順36)。

#### 【0069】

この近似関数の各項の係数および相関値には予め正常値と判断される範囲が設定されており、得られたこれらの値がこの正常範囲内にあるか否かを判断する(手順37)。正常範囲内に無い場合には測定結果にエラーがあったと判断する(手順38)。エラー処理の内容は係数および相関値の値によって異なり、わずかに正常範囲から外れている場合は再測定を行い、例えばV<sub>L</sub>やV<sub>R</sub>の電圧値によらず可動素子がほぼ変位しない場合は可動素子または変位検出部6が故障していると判断してエラー表示を行い、変換テーブルの書き換えを禁止する。

#### 【0070】

正常範囲内にある場合には、測定結果を有効と判断して変換テーブルを更新し(手順39)、次の可動素子の測定に移行する(手順40)。n番目の可動素子Anの測定が終了すると変換テーブルの作成ルーチンは完了する。

#### 【0071】

変換テーブルの作成が完了すると、マイクロアクチュエータはこれを用いた制御動作に移行する。切り替え部7は全ての可動素子A1~Anを、駆動制御を行う駆動モードとする。

#### 【0072】

本実施形態での可動素子の制御は開ループ制御であって、目標変位設定部11によって各可動素子A1~Anの目標変位が設定されると、変換部12によって駆動電圧に関わる目標データに変換され、電圧指令部13により指令された駆動電圧を与えられて、可動素子A1~Anは所望の姿勢に制御される。

#### 【0073】

以上説明したような本実施形態のマイクロアクチュエータによれば、自己の駆動力で得られた変位量を自己検出する構成を備えているために、外部の変位測定器が不要であり、位置合わせなどのセッティングに関わる煩雑な作業を必要とせず、極めて簡易に個別の可動素子の特性ばらつきを補正する変換テーブルを作成することができる。

#### 【0074】

また、装置に組み込まれた状態で測定が可能であるため、経時変化や温度などの環境変化に伴う可動素子特性の変化にも対応することができる。

## 【0075】

さらに、切り替え部7が1つの変位検出部6を複数の可動素子に切り替えて巡回させながら変位検出を行っているために、多数の可動素子を備えたアクチュエータであっても、変位検出のための検出信号発生器、増幅器、A/D変換器などの数を大幅に低減させることができ、回路規模を削減してチップコストを削減することができる。

## 【0076】

なお、本実施形態では、駆動電圧発生部20と高周波信号発生部21とを別々に構成して接続した例について説明したが、両者を1つのDA変換器で構成し、電圧指令部13からの制御信号を周波数 $f$ で変調して $V_L + V_A \sin(2\pi ft)$ の出力電圧を得ても良い。またAC電圧の波形は正弦波でなく、矩形波としてもよい。駆動電圧発生部22と高周波信号発生部23とについても同様である。このようにすれば、変位検出用の信号発生回路の多くが駆動制御用の回路と共用化され、回路全体の簡素化を図ることができる。

## 【0077】

また、電圧指令部13はDC電圧成分 $V_L$ 、 $V_R$ のみを可変とした例について説明したが、AC電圧成分の振幅 $V_A$ を可変にすることもできる。特に電位差 $V_L - V_R$ の絶対値が小さいときには振幅 $V_A$ を大きくし、電位差 $V_L - V_R$ の絶対値が大きいときには振幅 $V_A$ を小さくすれば、以下の2つの効果がある。第1に、AC電圧成分による可動素子の変位への影響を抑えつつ検出感度を大きくすることができる。電位差 $V_L - V_R$ の絶対値が小さいときは、可動素子 $A_i$ の変位が小さく静電容量の変化 $C_{Li} - C_{Ri}$ も小さいため、検知信号 $V_{out}$ の振幅は小さくS/N比が得られにくい一方、AC電圧成分により可動素子 $A_i$ に発生する吸引力は固定電極 $E_{Li}$ 側と $E_{Ri}$ 側とでは釣り合って相殺されるため、可動素子の変位への影響が小さい。電位差 $V_L - V_R$ の絶対値が大きいときはこの逆の特性を示す。従って、電位差 $V_L - V_R$ の絶対値が小さいときには振幅 $V_A$ を大きくし、電位差 $V_L - V_R$ の絶対値が大きいときには振幅 $V_A$ を小さくすれば、AC電圧成分による可動素子の変位への影響を抑えつつ検出感度を大きくすることができる。第2に、同じ電源電圧に対して可動素子の測定可能な変位のレンジを広くとることができる。可動素子の測定可能な変位のレンジはDC電圧の設定レンジで決まり、これは全体の電圧からAC電圧成分を除いたものとなる。駆動電圧 $V_L$ または $V_R$ の絶対値が大きいときに振幅 $V_A$ を小さくすることで、同じ電源電圧に対して可動素子の測定可能な変位のレンジを広げることができる。

## 【0078】

また、本実施例では変位検出部6は1チャンネルとして説明したが、変位検出部6が複数のチャンネルを備え、全可動素子 $A_1 \sim A_n$ も複数のブロックに分割し、変位検出部6の各チャンネルが各ブロック内を巡回チェックするように構成してもよい。

## 【0079】

また、本実施例では可動素子は1つずつ変位検出部6と接続したが、複数の可動素子を同時に1つの変位検出部6と接続しても良い。この場合個々の可動素子のばらつきが平均化されて全体特性の変化を測る場合には精度の良い測定を行うことができる。温度特性変化などの環境変化に対して全ての可動素子がおよそ一定の傾向を持って特性が変化する場合には、こうして得られた全体的な補正データを個別の可動素子の変換データに加算すればよい。

## 【0080】

また、本実施例では駆動信号をDC信号としたが、これに限定されるものではなく、可動素子に所望の変位を与えうる駆動信号として可動素子の1次共振周波数以下の低周波数の駆動信号を与え、変位検出部6により可動素子の振幅と位相とを測定することにより、可動素子の応答特性を測定することもできる。また駆動信号の周波数を可動素子の1次共振周波数付近でシフトさせて共鳴点を探索することで、可動素子の共振周波数自身を測定することもでき、これによっても精度良く可動素子の応答特性を測定することができる。較正部15はこれらの応答特性から可動素子の電圧-変位特性を算出し、変換部12に格納して利用することができる。可動素子の1次共振周波数 $f_0$ と傾動に関するバネ定数 $k$ とは $f_0$ が $k$ の平方根に比例するという関係を利用することにより、1次共振周波数 $f_0$ の変



化を検出して静的な駆動電圧と変位の関係を較正することもできる。

【0081】

また、本実施の形態では、可動素子を静電型可動素子、変位検出部 6 の変位検出方式を静電容量検出方式として説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、例えば可動素子に圧電素子を用い、変位検出方式をこの圧電効果を利用したものとしてもよい。

【0082】

(実施形態 2)

図 4～5 を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの第 2 の実施形態を説明する。図 4 は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの概略構成図である。

【0083】

本実施形態のマイクロアクチュエータは、可動部 4、変位検出部 6、切り替え部 7、I/F 部 10、目標変位設定部 11、変位検出制御部 14 については実施形態 1 で説明した構成と同一の構成を有している。実施形態 1 と異なる部分は制御部 50 の構成であり、本実施形態では、制御部 50 は変位検出部 6 の出力を用いて可動素子 A1～An に対し間欠的な閉ループ制御を行う。

【0084】

制御部 50 は電圧指令部 51 を備え、電圧指令部 51 はサーボ制御部 52 と電圧値ホールド部 53 とを備える。

【0085】

サーボ制御部 52 は目標変位設定部 11 と変位検出部 6 との差を誤差信号  $\epsilon$  として入力し、所望の制御特性を持たせるための PID 制御器を備え、この制御出力として電圧値  $V_L$ 、 $V_R$  の指令値を与えて選択された可動素子  $A_i$  に対する閉ループ制御を行う。また、サーボ制御部 52 は、誤差信号  $\epsilon$  の値およびその時間微分値が所定値以下になった場合に上記の制御が収束したと判断し、可動素子  $A_i$  に対する閉ループ制御を終了して開ループ制御に切り替えると共に、次の可動素子  $A_{i+1}$  に対する閉ループ制御を行う。より詳細には、制御の収束を判断すると、サーボ制御部 52 はその時点における電圧値  $V_L$ 、 $V_R$  の指令値を電圧値ホールド部 53 に出力する。電圧値ホールド部 53 はこの電圧値  $V_L$ 、 $V_R$  の指令値を可動素子  $A_i$  に対する指令値  $V_{Li}$ 、 $V_{Ri}$  として保持し、次回に再びサーボ制御部 52 から可動素子  $A_i$  に対する新たな指令値を入力するまでは、この指令値を出力する。切り替え部 7 は可動素子  $A_i$  の接続先を変位検出部 6 から電圧値ホールド部 53 に切り替え、可動素子  $A_{i+1}$  の接続先を電圧値ホールド部 53 から変位検出部 6 に切り替える。

【0086】

以上のように構成したマイクロアクチュエータの動作について、図 5 を参照しながら説明する。図 5 は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの間欠閉ループ制御ルーチンのフローチャートである。

【0087】

まず、 $i = 1$  とし (手順 60)、閉ループ制御を行う可動素子  $A_i$  として 1 番目の可動素子  $A_1$  を選択する。切り替え部 7 が可動素子  $A_i$  を変位検出部 6 に接続する (手順 61)。このとき、 $A_i$  以外の全ての可動素子は電圧値ホールド部 53 と接続され、この出力値を基に開ループ制御されている。

【0088】

可動素子  $A_i$  の制御電圧値  $V_L$ 、 $V_R$  の初期値は電圧値ホールド部 53 に前回保持した  $V_{Li}$ 、 $V_{Ri}$  の値を用いる (手順 62)。変位検出部 6 は可動素子  $A_i$  の変位を検出し、この検出変位量を目標変位設定部 11 が出力した目標変位量と一致するようにサーボ制御部 52 は閉ループ制御を行う (手順 63)。

【0089】

検出変位量と目標変位量との誤差信号  $\epsilon$  の絶対値が所定値  $\alpha$  となり、かつ誤差信号  $\epsilon$  の時間微分値  $\Delta \epsilon / \Delta t$  の絶対値が所定値  $\beta$  以下になった場合にはサーボ制御部 52 は制御が収束したと判断し (手順 64)、サーボ制御部 52 はその時点における電圧値  $V_L$ 、 $V_R$  の指令値を電圧値ホールド部 53 に出力する。電圧値ホールド部 53 はこの電圧値  $V_L$ 、 $V_R$  の

指令値を可動素子  $A_i$  に対する指令値  $V_{Li}$ 、 $V_{Ri}$  として保持する（手順 65）。また、切り替え部 7 は可動素子  $A_i$  の接続先を変位検出部 6 から電圧値ホールド部 53 に切り替える（手順 66）。これにより、可動素子  $A_i$  に対する閉ループ制御から開ループ制御への切り替えが完了し、次の可動素子  $A_{i+1}$  の閉ループ制御に移行する（手順 67）。 $n$  番目の可動素子  $A_n$  の閉ループ制御が完了する（手順 68）と間欠閉ループ制御ルーチンは一巡する。

#### 【0090】

この間欠閉ループ制御ルーチンは少なくとも目標変位設定部 11 の出力値が更新された場合には必ず実行され、可動素子  $A_1 \sim A_n$  は所望の姿勢に制御される。あるいは常時定期的にこのルーチンを実行してもよい。

#### 【0091】

以上説明したような本実施形態のマイクロアクチュエータによれば、切り替え部 7 が 1 つの変位検出部 6 およびサーボ制御部 52 を複数の可動素子に切り替えて巡回させながら閉ループ制御を行い、制御が収束した可動素子はその状態を保持する開ループ制御を行うため、多数の可動素子を備えたアクチュエータであっても、変位検出のための検出信号発生器、増幅器、A/D 変換器などの数を大幅に低減させることができ、回路規模を削減してチップコストを削減することができる。

#### 【0092】

（実施形態 3）

図 6～7 を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの第 3 の実施形態を説明する。図 6 は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの概略構成図である。

#### 【0093】

本実施形態のマイクロアクチュエータは、可動部 4、I/F 部 10、目標変位設定部 11、変位検出制御部 14、第 1 の駆動電圧発生部 20、第 1 の高周波信号発生部 21、第 2 の駆動電圧発生部 22、第 2 の高周波信号発生部 23、オペアンプ 24、コンデンサ 25、MOS トランジスタ 26、増幅器 27、A/D 変換器 28 については実施形態 2 で説明した構成と同一の構成を有している。

#### 【0094】

実施形態 2 と異なる部分は切り替え部 70、変位検出部 71、制御部 75 の構成である。本実施形態では、変位検出部 71 については、変位検出信号から周波数  $f$  の信号のみを抽出する構成を付加し、（数 1）の右辺第 2 項に示された駆動電圧  $V_L$ 、 $V_R$  の変化  $\Delta V_L$ 、 $\Delta V_R$  によるオフセットを軽減し、閉ループ制御精度を高めている。また、サーボ制御部 77 による閉ループ制御が収束した後は切り替え部 70 が可動素子  $A_i$  との接続を切り、端子  $T_{Li}$ 、 $T_{Ri}$ 、 $T_{Pi}$  を高インピーダンスとして電極間に蓄積された電荷を保持する構成としたことにより、電圧値ホールド部を保持しない簡素な間欠閉ループ制御を行っている。

#### 【0095】

切り替え部 70 には、可動素子  $A_1 \sim A_n$  の各々に対応したスイッチ  $S_1 \sim S_n$  が配設されている。スイッチ  $S_i$  は可動素子  $A_i$  の各端子  $T_{Li}$ 、 $T_{Ri}$ 、 $T_{Pi}$  と接続し、スイッチを ON した場合には各端子をそれぞれ変位検出部 71 を含む駆動回路に接続し、スイッチを OFF した場合には各端子を浮遊状態にする。各 3 つの端子の ON、OFF の切り替えは一括して行われる。

#### 【0096】

変位検出部 71 には、実施形態 2 の構成に加えて、発振器 72、乗算器 73、ローパスフィルタ 74 を備える。発振器 72 は、第 1 の高周波信号発生部 21 と同一の周波数  $f$  を持つ AC 信号を発生する。また、発振器 72 が発生する AC 信号の位相は、第 1 の高周波信号発生部 21 の発生電圧の位相と同一に設定される。乗算器 73 は、増幅器 27 の出力と発振器 72 の出力とを乗じる。これにより、増幅器 27 の出力成分のうち周波数  $f$  の信号成分のみが抽出され、この周波数  $f$  の信号成分の振幅に比例する DC 電圧が出力される。乗算器 73 からの出力はローパスフィルタ 74 によってフィルタリングされた後に、A/D 変換器 28 により A/D 変換される。これにより、閉ループ制御時の駆動電圧  $V_L$ 、 $V_R$  の変



化 $\Delta V_L$ 、 $\Delta V_R$ が発生するオフセット電圧を低減し、位置検出精度を高めている。

【0097】

制御部75は電圧指令部76を備え、電圧指令部76はサーボ制御部77を備える。

【0098】

サーボ制御部77は目標変位設定部11と変位検出部71との差を誤差信号 $\epsilon$ として入力し、この制御出力として電圧値 $V_L$ 、 $V_R$ の指令値を与えて選択された可動素子 $A_i$ に対する閉ループ制御を行う。

【0099】

また、制御部75はクロックカウンタ（不図示）を備えており、切り替え部70のスイッチ $S_i$ がONになった時点を開始点として、各可動素子 $A_i$ がサーボ制御部77と接続されている時間を計測する。

【0100】

各可動素子 $A_i$ の閉ループ制御に割り当てられる時間には上限値 $\tau$ が設定されている。誤差信号 $\epsilon$ の値およびその時間微分値が所定値以下になって制御が収束するか、または閉ループ制御の所要時間が上限値 $\tau$ 以上となると、制御部75は可動素子 $A_i$ に対する閉ループ制御を終了する。上限値 $\tau$ は通常の状態においては制御が収束するのに十分な値に設定されている。上限値 $\tau$ は固定値でもよいが、それまでの可動素子の制御所要時間の履歴を反映させて決定しても良い。例えば、1つ前の可動素子 $A_{i-1}$ の上限値 $\tau$ に対して実際の収束時間 $t_{i-1}$ が小さかった場合に、その余剰時間 $\tau - t_{i-1}$ の全部または一部を可動素子 $A_i$ の上限値 $\tau$ に繰り越して上乗せしても良い。

【0101】

サーボ制御部77による可動素子 $A_i$ への閉ループ制御を終了すると同時に、切り替え部70はスイッチ $S_i$ をOFFして端子 $T_{Li}$ 、 $T_{Ri}$ 、 $T_{Pi}$ を浮遊状態にする。これにより可動素子 $A_i$ が形成するキャパシタ $C_{Li}$ 、 $C_{Ri}$ に蓄えられた電荷量は、漏洩電流による消失量が十分に小さい時間内は一定に保たれ、可動素子 $A_i$ の変位は閉ループ制御完了時の状態で保持される。

【0102】

切り替え部70は次のスイッチ $S_{i+1}$ をONし、制御部75は可動素子 $A_{i+1}$ に対する閉ループ制御を行う。このように、順次、可動素子の閉ループ制御を時系列で行っていく。最後の可動素子 $A_n$ の閉ループ制御を完了すると、再び最初の可動素子 $A_1$ に戻って2サイクル目の閉ループ制御を行う。このサイクルの周期時間をフレーム周期時間と呼ぶことにする。フレーム周期時間は、マイクロアクチュエータに求められる応答性能条件と、キャパシタ $C_{Li}$ 、 $C_{Ri}$ に蓄えられた電荷量の漏洩電流による消失が十分小さくなるための条件から決定される。各可動素子 $A_i$ に割り当てた時間の上限値 $\tau$ は、このフレーム周期時間が満たすべき条件を満足するように設定されている。例えば、上限値 $\tau$ を固定値とした場合は $n \cdot \tau$ がフレーム周期時間となる。ところで、特に閉ループ制御をデジタル制御で行う場合には、上限値 $\tau$ や経過時間 $t_i$ との比較を実際に時間を計測して行う代わりに、閉ループ制御の繰り返しループ回数をカウントして、ループ回数の上限值と比較管理してもよい。ループ回数管理も間接的に時間を管理している点で本質的に時間管理に含まれるが、管理手続きをより簡単にすることができる。

【0103】

以上のように構成したマイクロアクチュエータの動作について、図7を参照しながら説明する。図7は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの間欠閉ループ制御ルーチンのフローチャートである。

【0104】

まず、上限値 $\tau$ を初期値 $\tau_0$ に設定する（手順80）。初期値 $\tau_0$ はフレーム周期時間の $1/n$ の値であり、予めROMに格納されたものである。次に、 $i = 1$ とし、閉ループ制御を行う可動素子 $A_i$ として1番目の可動素子 $A_1$ を選択する（手順81）。

【0105】

次に、切り替え部70がスイッチ $S_i$ をONし、可動素子 $A_i$ を変位検出部71に接続す

る(手順82)。このとき、 $A_i$ 以外の全ての可動素子はスイッチがOFFにされている。

#### 【0106】

可動素子 $A_i$ の制御電圧値 $V_L$ 、 $V_R$ の初期値は、目標変位設定部11の出力を変換部12で変換して作成した値を設定する(手順83)。変位検出部71は可動素子 $A_i$ の変位を検出し、この検出変位量を目標変位設定部11が出力した目標変位量と一致するようにサーボ制御部77は閉ループ制御を行う(手順84)。

#### 【0107】

検出変位量と目標変位量との誤差信号 $\epsilon$ の絶対値が所定値 $\alpha$ となり、かつ誤差信号 $\epsilon$ の時間微分値 $\Delta\epsilon/\Delta t$ の絶対値が所定値 $\beta$ 以下になった場合にはサーボ制御部77は制御が収束したと判断する(手順85)。収束と判断されない場合は、さらに経過時間 $t_i$ と上限値 $\tau$ とを比較し、 $t_i < \tau$ であれば閉ループ処理を継続する(手順86)。収束と判断された場合や経過時間 $t_i$ が上限値以上となった場合は、サーボ制御部77による可動素子 $A_i$ への閉ループ制御を終了し、切り替え部70がスイッチ $S_i$ をOFFして端子 $T_{Li}$ 、 $T_{Ri}$ 、 $T_{Pi}$ を浮遊状態にする(手順87)。

#### 【0108】

次に、余剰時間 $(\tau - t_i - 1)$ に係数 $\alpha$ を乗じて、次の可動素子に対する閉ループ処理時間の上限値 $\tau$ に繰り越す(手順88)。係数 $\alpha$ は $0 < \alpha < 1$ を満たす値とし、余剰時間が無制限に繰り越されて蓄積することを防止する。より好ましくは、係数 $\alpha$ は $0 < \alpha < \exp(-1/n)$ を満たす値とし、1フレーム周期時間以前の余剰時間の繰り越し結果の影響度を所定値 $(1/e)$ 以下に抑えている。

#### 【0109】

次に、 $i$ の値をインクリメントし、可動素子 $A_{i+1}$ の閉ループ制御に移行する(手順89)。こうして順次可動素子を切り替えながら閉ループ制御を行い、一巡して $n$ 番目の可動素子 $A_n$ の閉ループ制御が完了すると、再度二巡目として1番目の可動素子 $A_n$ の閉ループ制御を開始する(手順90)。

#### 【0110】

以上説明したような本実施形態のマイクロアクチュエータによれば、サーボ制御部77による閉ループ制御が収束した後は切り替え部70が可動素子 $A_i$ との接続を切り、端子 $T_{Li}$ 、 $T_{Ri}$ 、 $T_{Pi}$ を高インピーダンスとして電極間に蓄積された電荷を保持する構成としているので、簡易な構成で多数の可動素子を巡回する間欠的な閉ループ制御を行うことができる。

#### 【0111】

また、各可動素子の閉ループ制御に割り当てられる時間に上限値 $\tau$ を定めているために、閉ループ制御の収束結果によらずマイクロアクチュエータとしてのフレーム周期時間を確保することができる。

#### 【0112】

また、この上限値 $\tau$ をそれまでの可動素子の制御所要時間の履歴を反映させて決定しているために、フレーム周期時間の確保と閉ループ制御精度の向上とを両立させることができる。

#### 【0113】

(実施形態4)

図8～10を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの第4の実施形態を説明する。本実施形態のマイクロアクチュエータは上下動作と2軸の傾動動作を行う静電アクチュエータであり、補償光学用の可変形ミラーに適用されている。

#### 【0114】

図8は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの分解斜視図である。ここでは1つの微小ミラーユニットを拡大したものが図示されている。1つの微小ミラーユニットは、互いに独立に駆動される3組の可動素子によって3自由度の変位を与えられ、これによって上下動作と2軸の傾動動作が可能となっている。各可動素子はヨークと固定電極との対

を備える。

【0115】

微小ミラーユニットは32個×32個の総数1024個が2次元にアレイ化されている。ヨークと固定電極との対からなる可動素子の総数はこの3倍の3072個である。

【0116】

基板100上には駆動回路100aが形成され、その上に絶縁層101が形成される。絶縁層101上にはベース102および3対の固定電極103～105が形成される。ベース102および固定電極103～105は、アルミニウム (Al) または多結晶シリコン等の導電膜をパターンニングすることによって形成されている。固定電極103は互いに独立に電圧設定が可能な第1電極103Lおよび第2電極103Rを備える。固定電極104、105も同様に、それぞれ第1電極104L、105Lおよび第2電極104R、105Rを備える。

【0117】

第1電極103L～105Lおよび第2電極103R～105Rは、それぞれが絶縁層101に形成されたビア (不図示) によって基板100に形成された駆動回路100aに接続されている。駆動回路100aは、0～30Vの範囲内で各々独立した電圧を第1電極103L～105Lおよび第2電極103R～105Rに印加することができる。この印加電圧は例えば12bitの多段階の値として設定され得る。

【0118】

3つのヨーク107～109がそれぞれ1対のヒンジ106によって取り付けられ、さらにこれらのヨーク107～109を微小ミラー110に連結するための中間連結部材111が設けられている。ヒンジ106はベース102と一体に接合し、電気的に導通している。各ベース102は、絶縁層101に形成されたビア (不図示) によって駆動回路100aに接続されている。隣接するベース102同士は互いに電気的に分離しており、それぞれが独立して駆動回路100aに接続されている。

【0119】

ヨーク107～109は、対応する固定電極103～105に対向し、それぞれが可動電極として機能する。ヨーク107～109は、アルミニウム (Al) または多結晶シリコン等の導電性部材をパターンニングすることによって形成され、ベース102と導通して接地電位に設定されている。ヨーク107～109は、それぞれ第1電極103L～105Lおよび第2電極103R～105Rに対向する位置に第1の部分107L～109Lおよび第2の部分107R～109Rを有している。ヨーク107～109は互いに同一の形状をしており、特に断らない限り、1つのヨークについての説明内容は他のヨークについても適用される。

【0120】

ヨーク108は回動軸A1を中心に回動自在に支持され、ヨーク107、109は回動軸A2を中心に回動自在に支持される。回動軸A1 (またはA2) と直交する方向をxとし、x方向に隣接する可動素子のピッチ間隔をpとすると、回動軸A1と回動軸A2とは互いにx方向に半ピッチ分 ( $=p/2$ ) だけずれた位置に設けられる。このように、y方向に隣接するヨーク同士は回動軸が互いにx方向に半ピッチ分ずらされて、市松模様状に配列される。ヨーク107を支持するヒンジ106は、ヨーク108と隣接するヨーク108' との間隙間に沿在するように配設される。

【0121】

第1電極103Lに駆動電圧を与えた場合、ヨーク107の第1の部分107Lが第1電極103L側に吸引される。これに対し、第2電極103Rに駆動電圧を与えた場合は、第2の部分107Rが第2電極103R側に吸引される。このようにして、回動軸Aを中心にしてCW (時計回り) 方向、CCW (反時計回り) 方向の何れに対しても、選択的に回動力を付与できる。

【0122】

第1の部分107Lの遊端近傍の駆動点107c (斜線で表示) において、ヨーク10

7は中間連結部材111の突起111aと結合する。また駆動点107cの近傍にはヨーク107を貫通する溝穴107dを設ける。

#### 【0123】

中間連結部材111は、3点の突起111a～111cを備え、突起111aはヨーク107の駆動点107cと連結し、突起111bはヨーク108の駆動点108cと連結し、突起111cはヨーク109の駆動点109cと連結している。このため、ヨーク107～109を個別に回転駆動させると、突起111a～111cの変位を独立に制御できることになり、これによって中間連結部材111の姿勢が定まる。突起111a～111c近傍には中間連結部材111を貫通する溝穴113a～113cを設ける。

#### 【0124】

微小ミラー110は、突起114によって中間連結部材111の斜線部112と結合している。微小ミラー110と中間連結部材111とは一体に結合しているため、微小ミラー110の姿勢は中間連結部材111の姿勢によって決定される。x方向に隣接する微小ミラー110のピッチ間隔pは $100\mu\text{m}$ 、ミラー長さLは $98\mu\text{m}$ である。

#### 【0125】

第1電極103L～105L、第2電極103R～105Rへの駆動電圧を独立に制御することにより、微小ミラー110は、z方向の変位、x軸周りの傾き、y軸周りの傾きについて正負双方向に駆動される。

#### 【0126】

次に図9を参照して、駆動回路100aの詳細を説明する。図9は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの駆動回路100aの概略構成図である。ヨークと2つの固定電極とから構成される各可動素子も $A_{i,j}$ として一緒に記載されている。添字のiとjは可動素子の2次元アレイにおけるそれぞれ行と列の番地を表す。3つの可動素子で1つの微小ミラーユニットが構成されているため、jの値を3つ毎に区切った単位で1つの微小ミラーユニットに対応させている。例えば、 $A_{1,1}$ ～ $A_{1,3}$ は同じ微小ミラーを動かすための3つの可動素子である。微小ミラーユニットが $32$ 個 $\times 32$ 個のアレイであるため、iは1～32までの自然数、jは1～96までの自然数である。

#### 【0127】

各可動素子 $A_{i,j}$ には6個のスイッチング用のMOSトランジスタが接続されている。これらのMOSトランジスタはエンハンスメント型で、ゲート電圧をHにするとスイッチがONされ、LにするとスイッチがOFFされる。各MOSトランジスタによる電圧損失を小さくするためにゲート電圧は昇圧回路（不図示）により昇圧されたものが用いられる。

#### 【0128】

これらのうち、下側の3個のMOSトランジスタは可動素子 $A_{i,j}$ を開ループ制御する際に用いられ、駆動用ワード線WDiをHにすると、駆動用ビット線BDjL、BDjR、BDjPをそれぞれ可動素子 $A_{i,j}$ の第1電極、第2電極、ヨークに接続する。

#### 【0129】

また、上側の3個のMOSトランジスタは可動素子 $A_{i,j}$ の変位を検出して電圧と変位との関係を較正する際に用いられ、検出用ワード線WSiをHにすると、検出用ビット線BSjL、BSjR、BSjPをそれぞれ可動素子 $A_{i,j}$ の第1電極、第2電極、ヨークに接続する。

#### 【0130】

駆動用ワード線WD1～WD32、検出用ワード線WS1～WS32はラインデコーダ120に接続され、切り替え制御部121からのアドレス信号Adr1に応じて選択されたワード線のみがHにされる。ラインデコーダ120はデマルチプレクサを用いて構成される。

#### 【0131】

まずは開ループ制御動作時の信号の流れに沿って、構成の説明を続ける。

#### 【0132】

I/F部122は、制御に関わる外部とのコマンドおよびデータをやりとりする。外部

から入力されるデータには、可変形ミラーが形成すべき波面の形状に関するデータが含まれる。この波面の形状データは、例えば  $x$   $y$  平面内の各座標位置における  $z$  方向への変位データ、あるいはZernike多項式による波面モード係数データとして与えられる。これらのデータは転送負荷を軽減するため圧縮して送っても良い。波面形状をフレーム単独で圧縮するフレーム内圧縮方式と、前の時間の波面形状との差分値をとるフレーム間圧縮方式と、両方式による圧縮データを所定枚数毎に織り交ぜて転送する方式が考えられる。あるいはもっと簡単な構成においては、予め登録された複数種類の波面形状の中から、所望の波面形状を呼び出してもよい。この場合は外部から入力されるデータは、波面形状の登録番号である。

#### 【0133】

目標変位設定部123は、I/F部122からの出力に基づき、各可動素子 $A_{i,j}$ の目標変位を与える目標変位データ $Z_{i,j}$ を発生する。各目標変位データ $Z_{i,j}$ は、 $i$ 、 $j$ の番地を表す12bit部と、目標変位の大きさを $-128 \sim 127$ までの256段階で表す8bit部を持つ計20bitのデータである。目標変位設定部123は、まず $j$ の値をインクリメントしながら、各目標変位データ $Z_{i,j}$ を1つずつ変換部124に出力する。 $j$ の値が最大値96に達したら $i$ をインクリメントする。従って、出力される目標変位データの順番は、 $Z_{1,1}$ 、 $Z_{1,2}$ 、 $\dots$ 、 $Z_{1,96}$ 、 $Z_{2,1}$ 、 $Z_{2,2}$ 、 $\dots$ というようになる。

#### 【0134】

変換部124は、目標変位データ $Z_{i,j}$ をアドレスとして与えるとこれに対応した電圧指令データ $D_{i,j}$ を出力する変換テーブルを備える。電圧指令データ $D_{i,j}$ は $-1024 \sim 1023$ までの2048段階の値を与える11bitデータであり、最上位ビットは正負を示す。すなわち、最上位ビットは可動素子 $A_{i,j}$ の駆動される固定電極が第1電極、第2電極のどちらであるかを示している。この変換テーブルは較正部134で作成され、変換部124内の書き換え可能なメモリに格納されている。電圧指令データ $D_{i,j}$ は1bitずつシフトレジスタ125に与えられる。シフトレジスタ125への電圧指令データ $D_{i,j}$ の送付が完了すると、すぐ引き続いて、次の可動素子 $A_{i,j+1}$ の電圧指令データ $D_{i,j+1}$ が送られる。

#### 【0135】

シフトレジスタ125は、変換部124から送られた電圧指令データ $D_{i,j}$ を1bitずつ順次転送していく。可動素子 $A_{i,1} \sim A_{i,96}$ に対応する電圧指令データ $D_{i,1} \sim D_{i,96}$ までの転送が完了した時点で、切り替え制御部121からラッチ126にストロブ信号 $Stb$ が与えられ、このタイミングでシフトレジスタ125内の電圧指令データ $D_{i,1} \sim D_{i,96}$ が一括してラッチ126に保持される。シフトレジスタ125の転送速度は16.9MHzで、11bit $\times$ 96個のデータを62.5 $\mu$ sで転送する。ラッチ126にデータを転送した後、シフトレジスタ125は直ちに次の行の可動素子 $A_{i+1,1} \sim A_{i+1,96}$ のデータを転送する。従って、ラッチ126は約62.5 $\mu$ s周期でストロブ信号 $Stb$ を受けることになり、この約62.5 $\mu$ sが可動素子 $A_{i,1} \sim A_{i,96}$ への電圧印加時間に相当する。

#### 【0136】

ラッチ126に保持された電圧指令データ $D_{i,1} \sim D_{i,96}$ は、96個のDAコンバータ127およびスイッチ128の各々により、各可動素子 $A_{i,j}$ の固定電極に印加する駆動電圧に変換される。ここでは可動素子 $A_{i,1}$ に対応するDAコンバータ127aとスイッチ128aを例にとって説明するが、他の95個のDAコンバータおよびスイッチも同様の構成を備える。

#### 【0137】

DAコンバータ127aは、11bitの電圧指令データ $D_{i,1}$ の下位10bitを入力し、0 $\sim$ 30Vの範囲で対応する大きさの駆動電圧を出力する10bitのDAコンバータである。

#### 【0138】

スイッチ128aは、11bitの電圧指令データ $D_{i,1}$ の最上位ビットを入力し、この最上位ビットの値が0ならば、駆動用ビット線 $BD_{1L}$ を接地電位に接続し、駆動用ビット線 $BD_{1R}$ をDAコンバータ127aの出力に接続する。また、最上位ビットの値が1ならば、駆動用ビット線 $BD_{1L}$ をDAコンバータ127aの出力に接続し、駆動用ビット線 $BD_{1R}$

を接地電位に接続する。これにより、可動素子  $A_{i,1}$  の目標変位が正の値の場合は DA コンバータ 127a の出力が第 2 電極側に接続され、負の値の場合は第 1 電極側に接続されて、可動素子を正負双方向に傾動制御することが可能になる。

#### 【0139】

このように、96 対の全ての駆動用ビット線  $BD_{1L}$ 、 $BD_{1R}$  に対して、スイッチ 128 がそのいずれか一方を選択して各 DA コンバータ 127 からの駆動電圧を印加する。

#### 【0140】

これと同時に、切り替え制御部 121 はラインデコーダ 120 に  $i$  行目の駆動用ワード線  $WD_i$  のみを H とするようなアドレス信号  $Adr_1$  を与える。駆動用ワード線  $WD_i$  が H となると、可動素子  $A_{i,1} \sim A_{i,96}$  がそれぞれ駆動用ビット線  $BD_{1L}$ 、 $BD_{1R}$ 、 $BD_{1P}$  と導通し、目標変位量に応じた開ループ制御が行われることになる。既に説明したように、可動素子  $A_{i,1} \sim A_{i,96}$  への駆動電圧の印加時間は  $62.5 \mu s$  である。一方、可動素子  $A_{i,j}$  の一次共振周波数は  $70 \sim 100 kHz$  であり、逆数をとって求めた応答時間は  $10 \sim 14 \mu s$  程度となる。このように、可動素子への駆動電圧の印加時間は可動素子の応答時間よりも十分大きな値に設定しているため、可動素子の変位が十分に整定した状態まで駆動電圧を印加し続けることが可能である。これにより、駆動電圧の印加完了後の可動素子の変位に伴う電極間の電圧変動の発生を防止し、開ループ制御における可動素子の変位精度を高めている。

。

#### 【0141】

開ループ制御時には、このように  $62.5 \mu s$  周期で  $i$  の値をインクリメントしていき、それぞれの行の可動素子  $A_{i,1} \sim A_{i,96}$  に所望の変位を与える。32 行全ての可動素子を開ループ制御するのに要する時間は  $2ms$  であり、これがフレーム周期時間となる。

#### 【0142】

次に、較正動作時の信号の流れに沿って、構成の説明を続ける。較正動作は電源起動時などに行い、その基本的な較正動作の流れは実施形態 1 で説明したものと同様である。実施形態 1 との主な違いは、配線の寄生容量などによるオフセットを除去して位置検出精度を高めた点と、DA コンバータ 131 の出力電圧および変位検出部 133 の差動入力にバイアス電圧  $V_A$  を与えて負側の出力を不要にした点にある。

#### 【0143】

電圧指令部 130 は、2 チャンネル分の電圧指令値を発生し、これを  $1 \sim 10 MHz$  程度の周波数で切り替えながら、それぞれのチャンネルの出力を DA コンバータ 131a、131b に与える。これにより DA コンバータ 131a は出力電圧  $V_L + V_A (1 + \sin(2\pi ft))$  を出力し、DA コンバータ 131b は出力電圧  $V_R + V_A (1 - \sin(2\pi ft))$  を出力する。実際にはこの振幅  $V_A$ 、周波数  $f$  の AC 電圧成分の波形は正弦波よりも矩形波の方が良い。較正動作時には、電圧指令部 130 は基本的には  $V_A$  の値を一定にしたまま、駆動電圧となる  $V_L$  と  $V_R$  のどちらか一方を  $0V$  とし、他方を複数段階に変化させることになる。これは実施形態 1 で説明した構成にバイアス電圧  $V_A$  を付加した構成となっており、DA コンバータ 131a、131b の出力電圧は常に正の値をとる。

#### 【0144】

切り替え部 132 は、切り替え制御部 121 のアドレス信号  $Adr_2$  に応じて、第  $j$  列目の検出用ビット線  $BS_{jL}$ 、 $BS_{jR}$ 、 $BS_{jP}$  をそれぞれ DA コンバータ 131a、131b、変位検出部 133 に接続する。

#### 【0145】

また、ラインデコーダ 120 は、切り替え制御部 121 のアドレス信号  $Adr_1$  に応じて、第  $i$  行目の検出用ワード線  $WS_i$  を H にする。これにより、検出用ビット線  $BS_{jL}$ 、 $BS_{jR}$ 、 $BS_{jP}$  がそれぞれ可動素子  $A_{i,j}$  の第 1 電極、第 2 電極、ヨークに接続される。こうして、選択された 1 つの可動素子  $A_{i,j}$  の第 1 電極、第 2 電極、ヨークがそれぞれ DA コンバータ 131a、131b、変位検出部 133 に接続されることになる。

#### 【0146】

変位検出部 133 の基本構成は実施形態 3 で説明した変位検出部 71 と同じであるが、



初段の差動増幅器 133a の正側入力にバイアス電圧  $V_A$  を付加した構成としている。これにより、DAコンバータ 131 で与えたバイアス電圧  $V_A$  分を補償して可動素子  $A_{i,j}$  の第 1 電極、第 2 電極、ヨーク間の各電位差の関係を開ループ制御時と同一に保ち、較正精度の低下を防止している。

#### 【0147】

較正部 134 は、電圧指令部 130 が出力する電圧指令値と、変位検出部 133 が出力する可動素子  $A_{i,j}$  の変位の検出結果とを入力し、電圧指令値と変位との対応関係を作成する。これらの関係は所定の形式の近似曲線にフィットさせることで測定誤差を除去し、補間された形で変換部 124 の変換テーブルに格納される。

#### 【0148】

以上のように構成したマイクロアクチュエータの動作について、図 10 を参照しながら説明する。図 10 は本実施形態におけるマイクロアクチュエータの較正動作ルーチンのフローチャートである。

#### 【0149】

まず、 $j=1$  と設定し（手順 140）、切り替え部 132 が第  $j$  列目の検出用ビット線  $B_{SjL}$ 、 $B_{SjR}$ 、 $B_{SjP}$  をそれぞれ DAコンバータ 131a、131b、変位検出部 133 に接続する（手順 141）。次に、 $i=1$  と設定し（手順 142）、可動素子  $A_{i,j}$  を変位検出の対象に選択する。電圧指令部 130 は電圧指令値  $D$  を最小値  $D_{min}$  に設定する（手順 143）。このとき、駆動電圧  $V_R$ 、 $V_L$  の大きさは  $V_R=0V$ 、 $V_L=30V$  に設定され、両者の差  $V_R-V_L$  は最低電圧（ $-30V$ ）となる。以降の説明において、電圧指令値  $D$  が負の値の場合は  $V_R=0V$  として  $V_L$  を正の値に設定し、 $D$  が正の場合は  $V_L=0V$  として  $V_R$  を正の値に設定するものとする。変位検出のための高周波信号がこれに重畳されているのは既に説明したとおりである。

#### 【0150】

可動素子  $A_{i,j}$  の変位検出に先立って、切り替え制御部 121 が全ての検出用ワード線  $WS1 \sim WS32$  を  $L$  に設定し、全ての可動素子  $A1,j \sim A32,j$  と検出用ビット線  $B_{SjL}$ 、 $B_{SjR}$ 、 $B_{SjP}$  との接続を  $OFF$  する（手順 144）。このときの変位検出部 133 の出力を、較正部 134 がオフセット値  $Z0(D)$  として記憶する（手順 145）。可動素子への接続は切断されているので、オフセット値  $Z0(D)$  は配線の寄生容量や駆動電圧の影響などによる誤差成分を表している。なお、この手順 144、145 の操作は  $i=1$  の場合のみ行う。

#### 【0151】

次に、検出用ワード線  $WSi$  を  $H$  とし、可動素子  $A_{i,j}$  を検出用ビット線  $B_{SjL}$ 、 $B_{SjR}$ 、 $B_{SjP}$  に接続する（手順 146）。このときの変位検出部 133 の出力を、較正部 134 が補正前の変位  $Z'(D)$  として記憶する（手順 147）。較正部 134 は、補正前の変位  $Z'(D)$  とオフセット値  $Z0(D)$  とから補正後の変位  $Z(D)$  を算出して記憶する（手順 148）。一般には  $Z(D)=Z'(D)-Z0(D)$  とすればよいが、例えば実験により得られた別の補正式を用いてオフセットを補正してもよい。

#### 【0152】

次に電圧指令値  $D$  を所定値だけ増加させ（手順 149）、 $D$  が最大値  $D_{max}$  になるまで（手順 150）、変位  $Z(D)$  の測定を繰り返す。これにより、較正部 134 には複数段階の  $D$  の値に対する変位  $Z(D)$  の測定結果が蓄積されている。較正部 134 はこれを所定の近似関数にフィッティングして測定誤差を除去し、さらにこの近似関数を用いて補間しながら、8bit の変位  $Z$  の各値に対応する 11bit の電圧指令値  $D$  を求める。これに可動素子  $A_{i,j}$  の番地  $i$ 、 $j$  を表す 12bit データを加えておくことで、可動素子  $A_{i,j}$  に対する変位  $Z$  と電圧指令値  $D$  との変換テーブルが出来上がる（手順 151）。

#### 【0153】

次に、 $i$  をインクリメントし（手順 152）、同じ第  $j$  列の 32 個の可動素子  $A1,j \sim A32,j$  について同様に変位  $Z$  と電圧指令値  $D$  との変換テーブルを作成する（手順 153）。

## 【0154】

次に、j をインクリメントし（手順154）、96列の可動素子全てについて同様に変位Zと電圧指令値Dとの変換テーブルを作成する（手順155）。

## 【0155】

このように、可動素子 $A_{i,j}$ を検出用ビット線 $BS_{jL}$ 、 $BS_{jR}$ 、 $BS_{jP}$ 等の配線に接続した状態で得られた変位Zを、可動素子 $A_{i,j}$ をこれらの配線から切り離した状態で得られたオフセット値Z0を用いて補正しているために、配線の寄生容量などによるオフセットの影響を除去し、可動素子 $A_{i,j}$ の位置検出精度を高めることができる。

## 【0156】

なお、本実施形態では、可動素子の変位検出を1つずつ接続を切り替えながら行ったが、電圧指令部130、DAコンバータ131a、131bおよび変位検出部133に相当する構成を複数対備えて、複数の可動素子の変位検出を同時に行っても良い。特に、1つの微小ミラーユニットに属する3つの可動素子を同時に駆動してこのときの各可動素子の変位をそれぞれ検出して較正を行うと、可動素子間の駆動力の伝達によるクロストーク的な変位が発生した場合にも、これらを補償するような制御を行うことができる。この場合、較正部134が作成する変換テーブルは、例えば可動素子 $A_{1,1}$ の変位 $(Z_{1,1})$ 、 $A_{1,2}$ の変位 $(Z_{1,2})$ 、 $A_{1,3}$ の変位 $(Z_{1,3})$ という3つの情報を持ったアドレスを与えると可動素子 $A_{1,1}$ への電圧指令値 $D_{1,1}$ が出力されるといったものになる。電圧指令値 $D_{1,1}$ に対する変位 $Z_{1,2}$ 、 $Z_{1,3}$ が与える影響が比較的小さければ、変位 $Z_{1,2}$ 、 $Z_{1,3}$ は上位ビットのみを用いればよい。

## 【産業上の利用可能性】

## 【0157】

本発明のマイクロアクチュエータは、可変形ミラーだけではなく、リレースイッチやチューナブルキャパシタなどの高周波回路用途、あるいはマイクロポンプなどの流体用途といった種々の用途に適用される。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0158】

【図1】本発明の実施形態1におけるマイクロアクチュエータの概略構成図である。

【図2】本発明の実施形態1におけるマイクロアクチュエータの駆動回路の概略構成図である。

【図3】本発明の実施形態1における較正動作ルーチンのフローチャートである。

【図4】本発明の実施形態2におけるマイクロアクチュエータの概略構成図である。

【図5】本発明の実施形態2における間欠閉ループ制御ルーチンのフローチャートである。

【図6】本発明の実施形態3におけるマイクロアクチュエータの概略構成図である。

【図7】本発明の実施形態3における間欠閉ループ制御ルーチンのフローチャートである。

【図8】本発明の実施形態4におけるマイクロアクチュエータの分解斜視図である。

【図9】本発明の実施形態4における駆動回路100aの概略構成図である。

【図10】本発明の実施形態4における較正動作ルーチンのフローチャートである。

## 【符号の説明】

## 【0159】

1、100

$A_1 \sim A_n$ 、 $A_{i,j}$

6、71、133

7、70

12、124

15、134

基板

可動素子

変位検出部

切り替え部

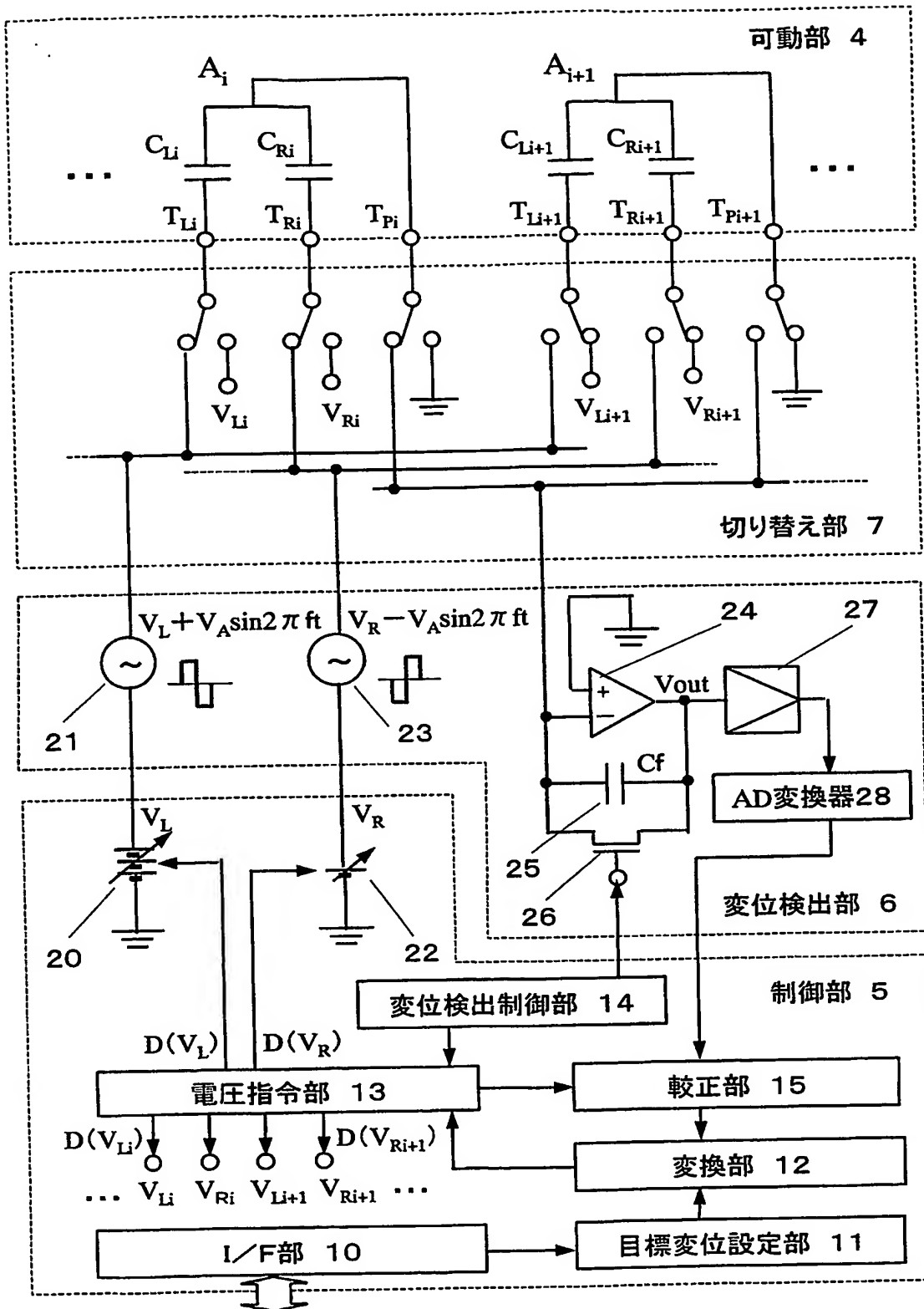
変換部

較正部

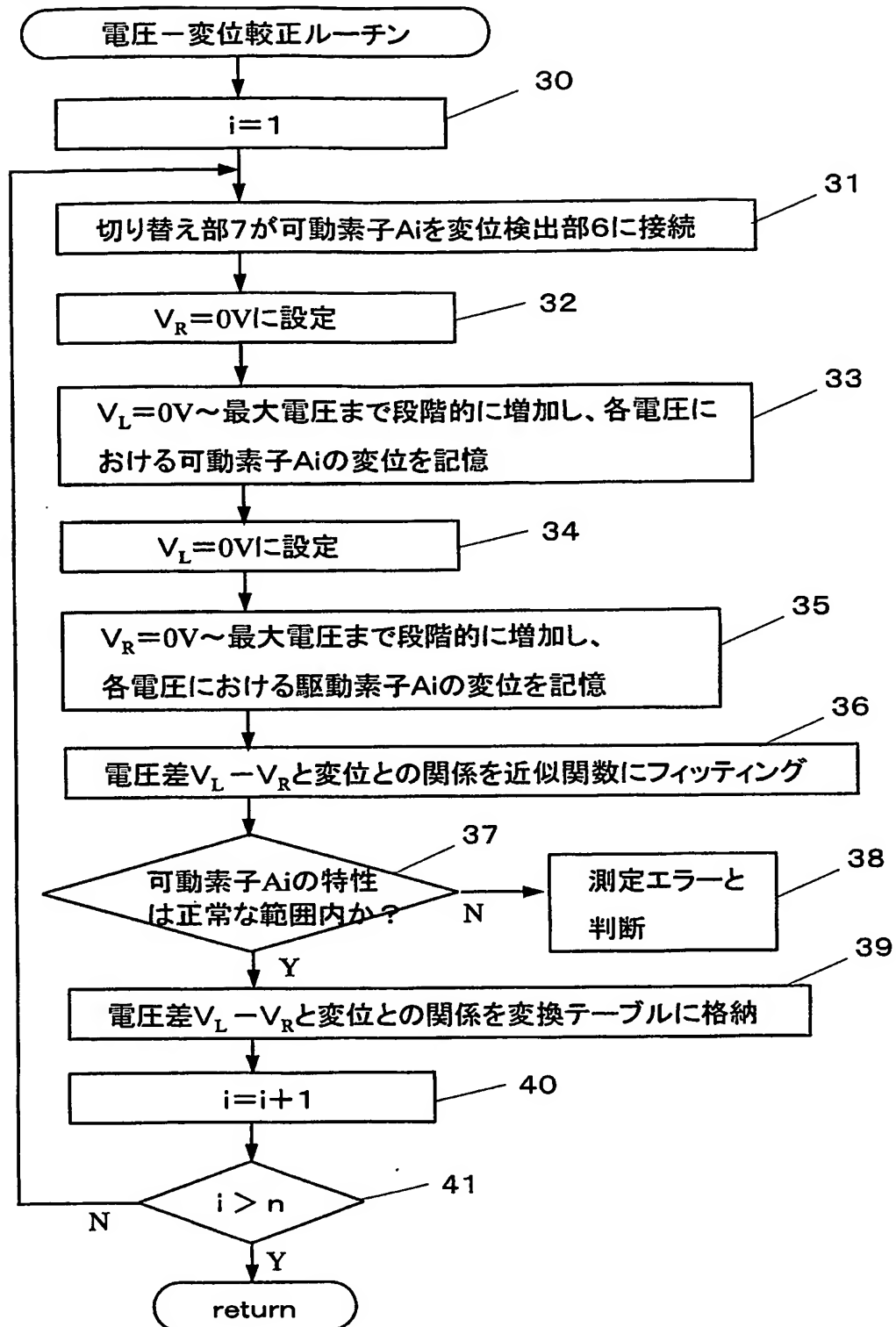




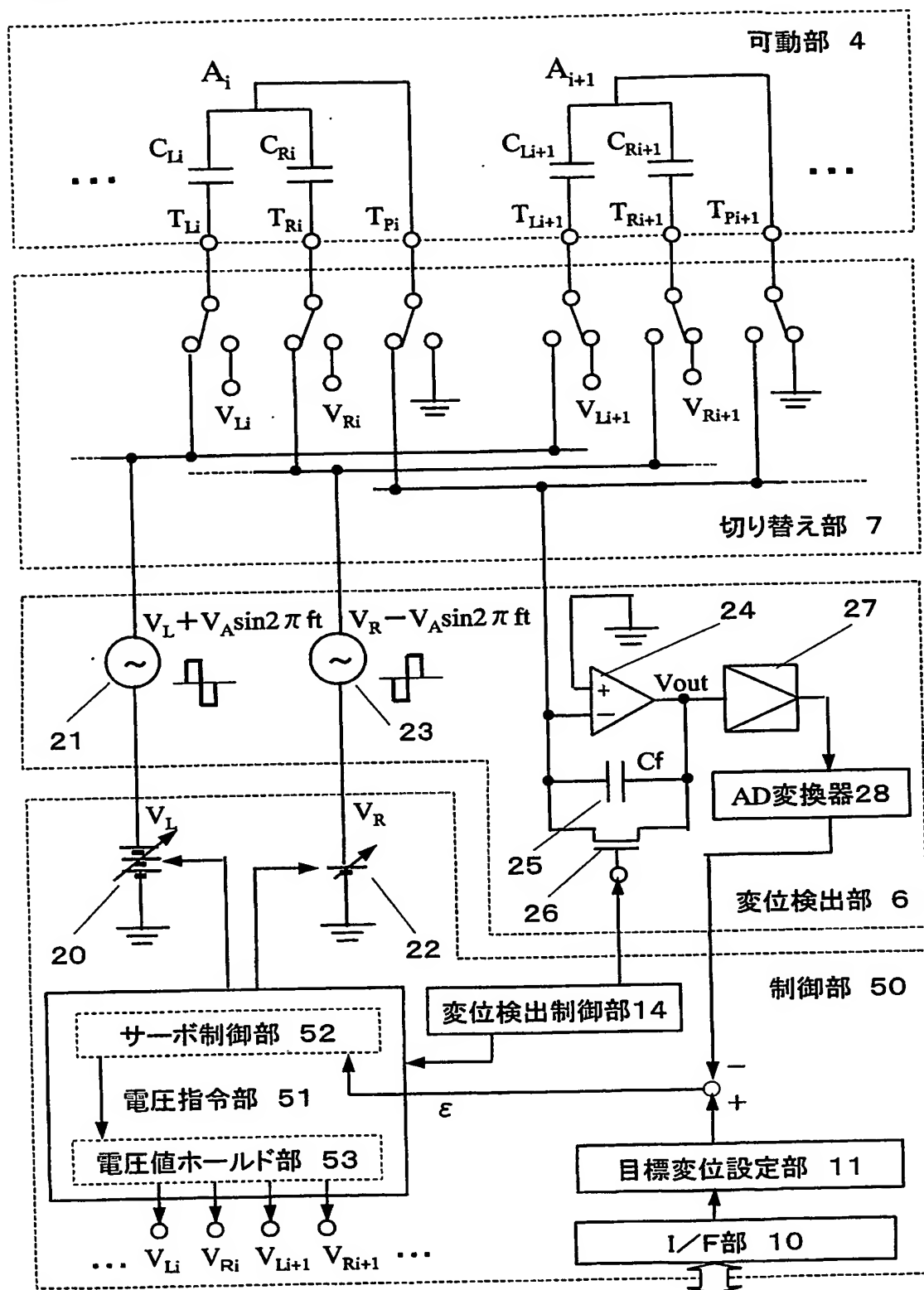
【図 2】



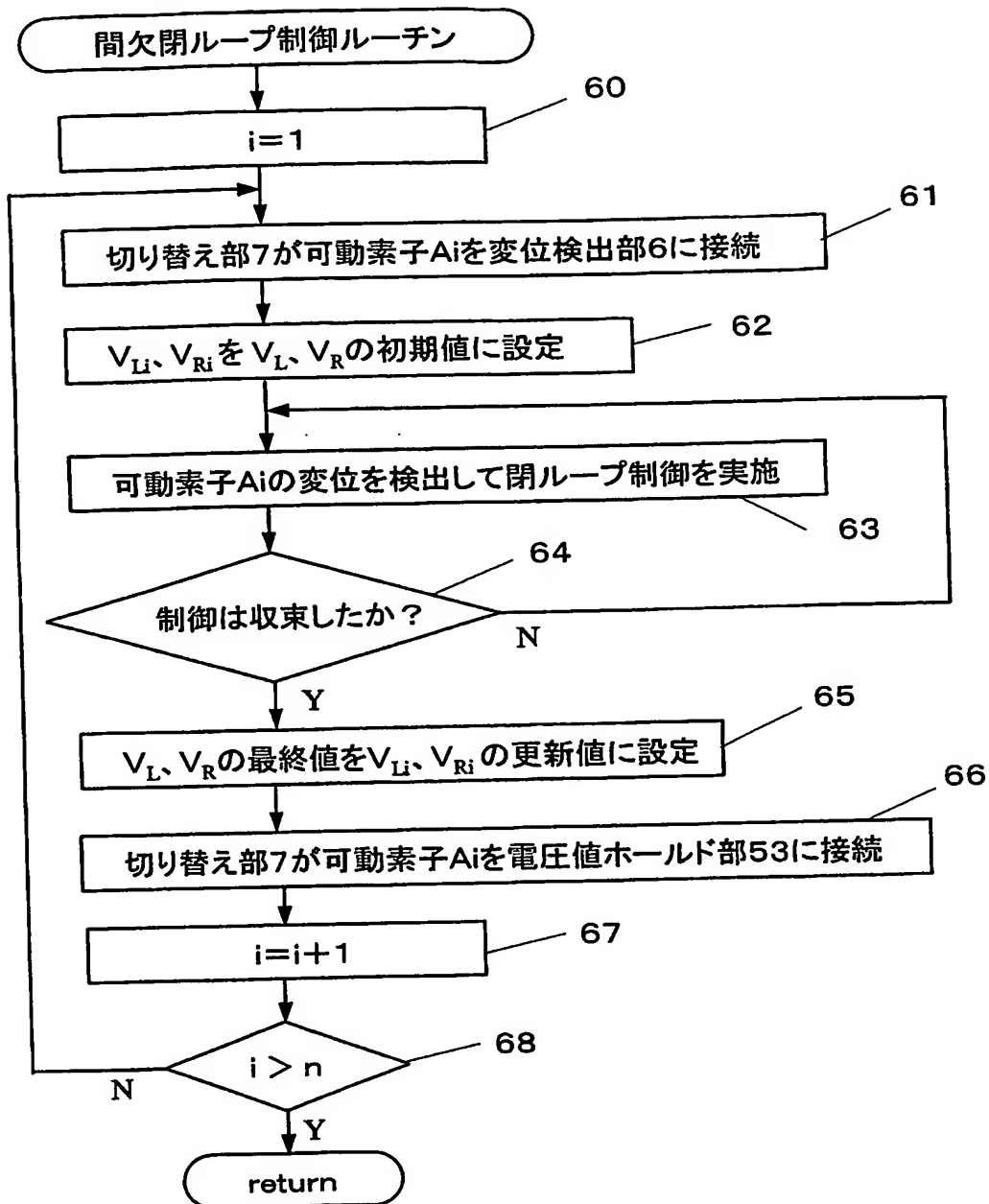
【図3】



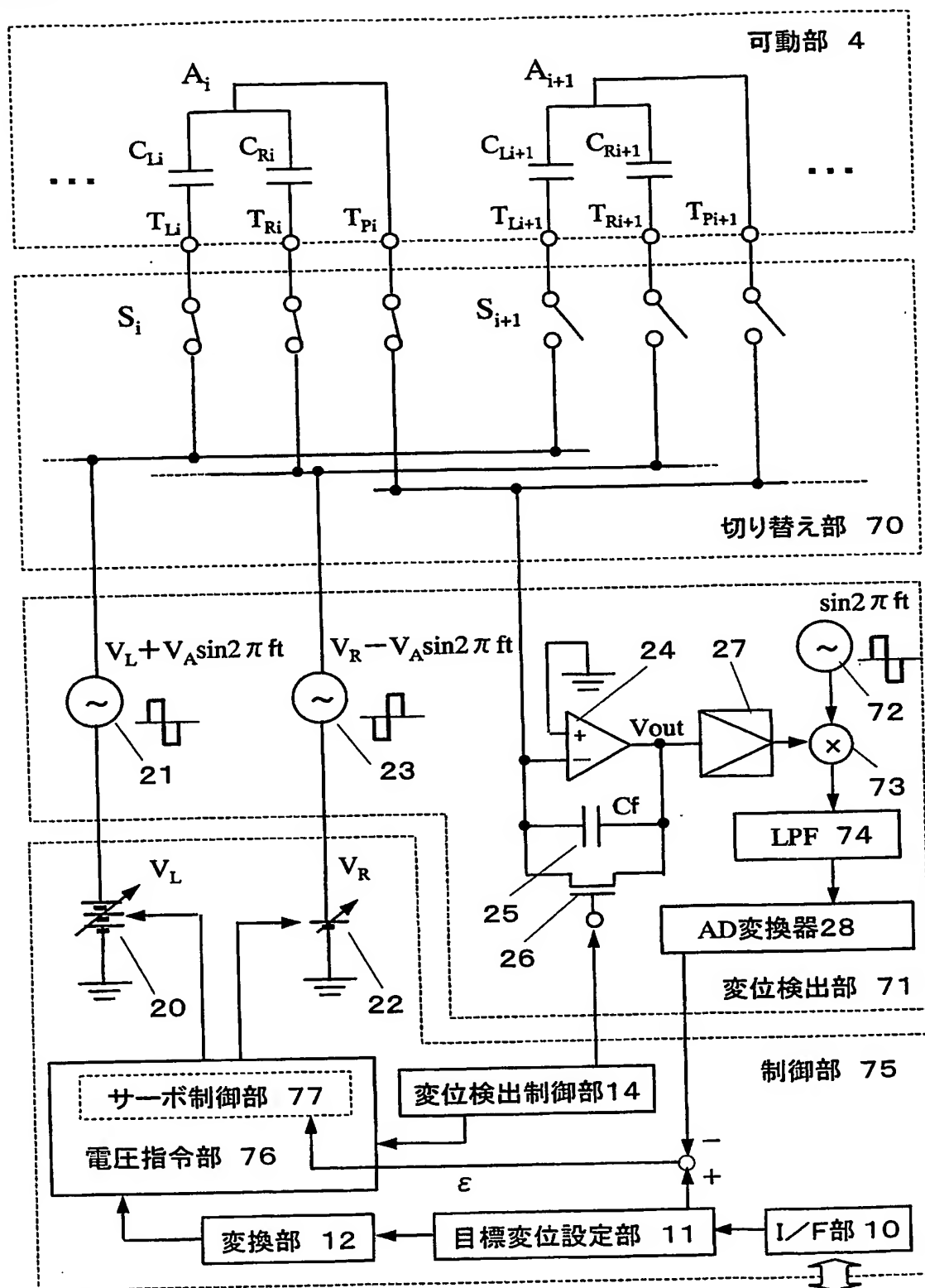
【図 4】



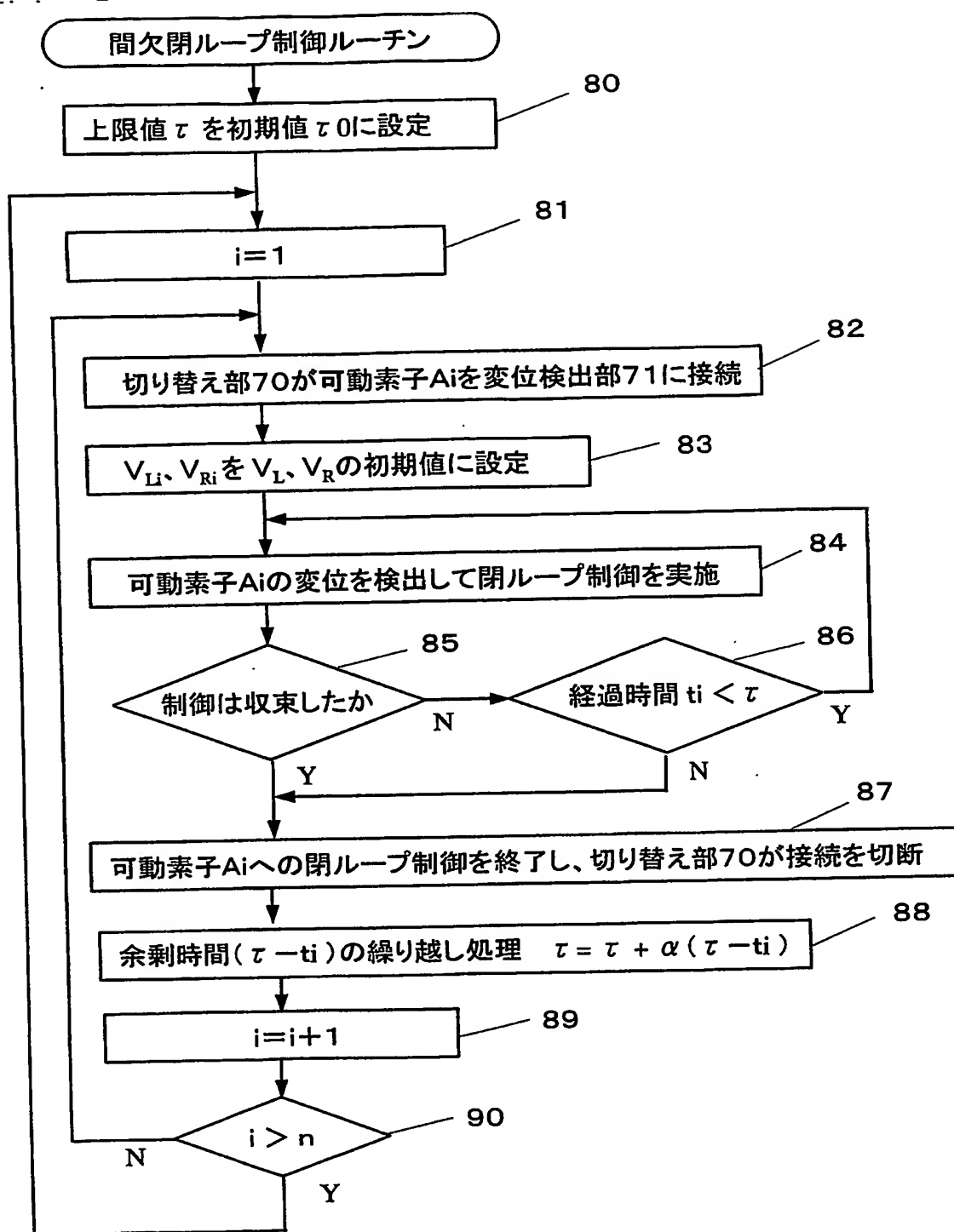
【図5】



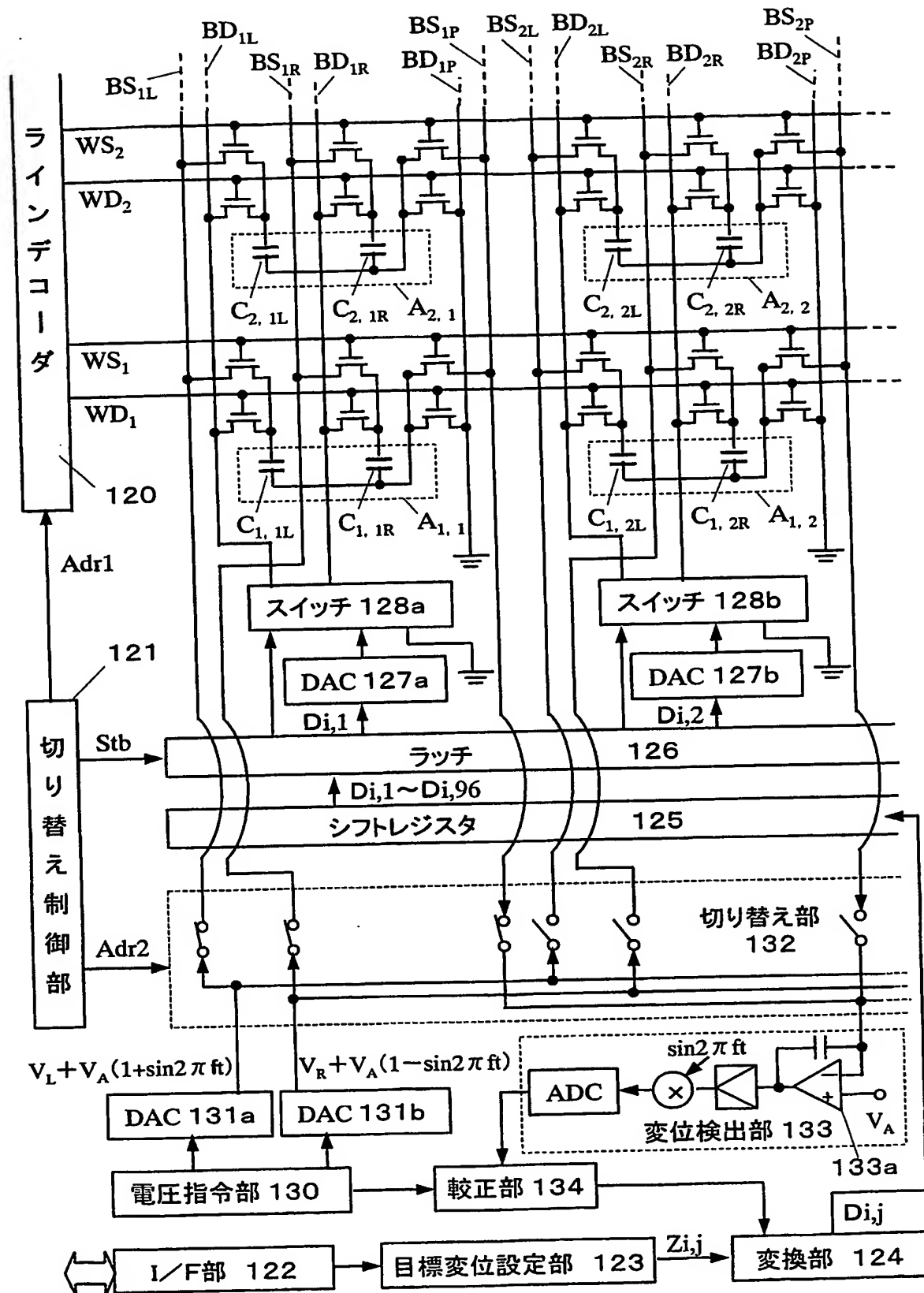
【図 6】



【図 7】

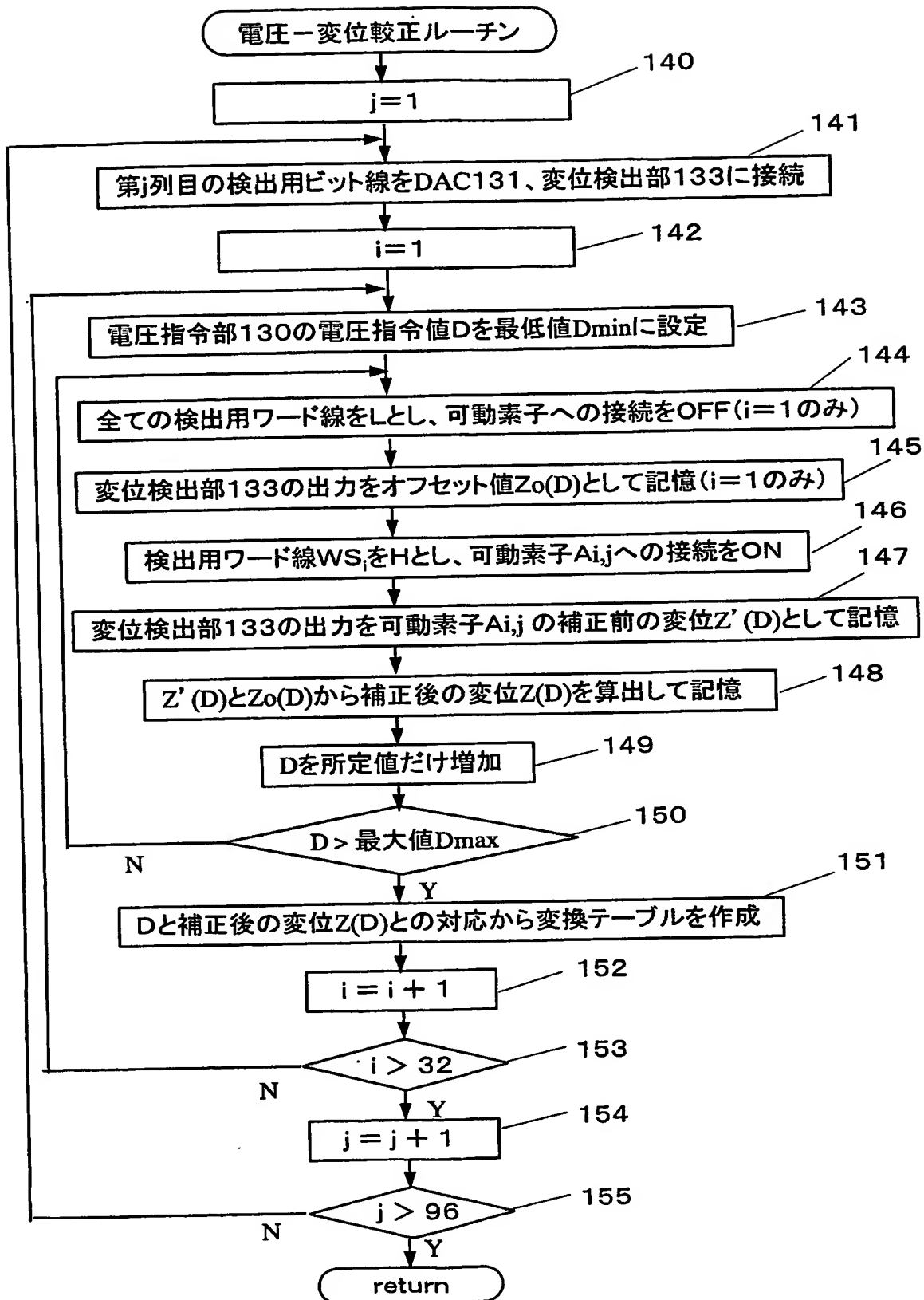


【図 9】





【図10】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 簡易な構成で、信頼性の高い位置制御を行うマイクロアクチュエータおよび可変形ミラーを提供する。

【解決手段】 静電駆動アクチュエータ等の可動素子  $A_i$  に、駆動信号を与えて変位させながら変位検出部 6 によりその変位を検出し、較正部 15 が駆動信号と変位との関係を自己較正することで、アクチュエータ特性の経時変化や環境変化を補正する。切り替え部 7 は 1 つの変位検出部を複数の可動素子  $A_i$  に選択的に接続することで、変位検出のための回路を削減する。

【選択図】 図 2

特願 2 0 0 3 - 3 5 2 7 3 6

出 願 人 履 歷 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 5 8 2 1 ]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 8 日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地

氏 名

松下電器産業株式会社